

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

Par :

Gbah KONE

CONTRIBUTION À L'AMÉLIORATION DE LA
MÉTHODE EN LIGNE DE MESURE DE CHAMP
ÉLECTRIQUE POUR DÉTECTER LA PRÉSENCE DE
DÉFAUTS INTERNES AU SEIN DES ISOLATEURS
COMPOSITES

AVRIL 2015

Résumé

L'utilisation des isolateurs composites dans les réseaux aériens de transport d'énergie électrique s'est accrue ces dernières années. Il devient alors important d'avoir une bonne connaissance de tous les phénomènes liés à leur exploitation afin de garantir leur bon état pour éviter toute défaillance qui entraîne une interruption de la fourniture en énergie électrique. En outre, les équipes de maintenance qui installent et remplacent régulièrement des isolateurs composites sur les lignes aériennes de transport d'énergie électrique ont besoin d'obtenir des informations pertinentes sur leur état de dégradation avant d'effectuer des travaux. Cela passe par la mise à disposition de méthodes qui permettent de détecter le plus tôt possible les défauts sur les isolateurs composites.

L'objectif général de ce travail de recherche est de mener en premier lieu des études numériques pour étudier l'influence des défauts internes au sein des isolateurs composites sur la distribution du champ électrique. Les défauts internes constituent la deuxième cause de défaillance des isolateurs composites. La détection précoce des défauts internes contribuera à garantir la fiabilité des réseaux d'énergie électrique et la sécurité des opérateurs pour les travaux en ligne. La validation expérimentale de ce projet de recherche, a été réalisée avec un capteur électro-optique (EO) qui permet de mesurer de manière déportée et ponctuelle deux composantes perpendiculaire du champ électrique. Aux meilleurs de nos connaissances, le capteur EO n'a encore fait l'objet d'aucune application à la détection des défauts internes au sein des isolateurs composites.

Dans un premier temps des études numériques basées sur l'utilisation des éléments finis à travers le logiciel Comsol Multiphysics ont été menées avec des modèles numériques tridimensionnels d'isolateurs composites utilisés aussi bien dans le domaine de la distribution que du transport de l'énergie électrique. Les défauts internes ont été modélisés sous la forme de cylindres semi-conducteurs et positionnés conformément à la majorité des observations réalisées sur le terrain.

Dans un second temps, des études expérimentales ont été menées. La mesure du champ électrique a été réalisée avec un capteur électro-optique (EO). Étant donné la difficulté à créer un défaut interne au sein d'un isolateur composite, un prototype d'isolateur composite 69 kV démontable a été utilisé. Le défaut interne a été simulé par un ruban de semi-conducteur.

Les résultats des simulations ont permis de mettre en évidence plusieurs avantages liés à la mesure simultanée des composantes axiale et radiale du champ électrique près de la surface de l'enveloppe d'un isolateur composite. Premièrement, une meilleure sensibilité de la détection d'un défaut interne par la mesure du champ électrique est obtenue lorsque les mesures s'effectuent au plus près du défaut interne (près de la surface de l'enveloppe). Deuxièmement, la mesure simultanée des composantes axiale et radiale du champ électrique permet de déterminer l'orientation du champ électrique le long d'une ligne près de la surface de l'enveloppe qui peut être exploitée pour la détection des défauts internes. Troisièmement, il a été démontré par simulation la faisabilité et la pertinence de la méthode de diagnostic proposée car elle permet une évaluation précise de la partie défectueuse (risques de contournement) d'un isolateur composite avant les travaux en ligne de maintenance. Enfin, le calcul des composantes du champ électrique (E) le long d'une ligne circulaire centrée sur l'enveloppe de l'isolateur permet de détecter et localiser les défauts internes. En outre, l'allure particulière des courbes du champ E obtenues peut être utilisée pour la détection automatique des défauts internes.

Les résultats des études expérimentales montrent qu'un défaut interne semi-conducteur de longueur correspondant à 3,5 % de la longueur totale de l'isolateur est visible quel soit sa position. Ceci constitue une grande avancée par rapport aux limites (grande taille, moins sensible et mesure loin du défaut) du dispositif actuellement utilisé pour le diagnostic des isolateurs composites par la mesure du champ électrique.

D'après ce qui précède nous pouvons dire que le capteur EO utilisé dans ce travail peut permettre d'améliorer la sensibilité de la méthode de diagnostic des isolateurs composites par la mesure du champ électrique. En outre, le calcul des composantes du champ électrique le long d'une ligne circulaire centrée sur l'enveloppe de l'isolateur peut être utilisé pour le diagnostic automatique des défauts internes. Cette méthode aura l'avantage d'être réalisée sans les valeurs références du champ électrique préenregistrées de l'isolateur testé comme c'est le cas actuellement. Ainsi, on pourra entreprendre toute action de diagnostic d'un isolateur sans avoir besoins de ses données de références.

Mots clés : Isolateur composite, défaut interne, champ électrique, simulation numérique, capteur électro-optique.

Abstract

Composite insulators and non-ceramic insulators (NCI) have been widely used on electrical networks since last year. Hence, it is important to ensure their good condition in order to avoid a threat to the network integrity. In addition, the live line workers need relevant information about insulators integrity before starting work. This requires appropriate diagnostic methods that can detect as soon as possible the defective insulators.

The aim of this research is to investigate the influence of composite insulators internal defects on the electric field distribution. Internal defects are the second cause of composite insulators failures. Internal defects early detection will help to ensure electric power systems reliability and operator safety for live line work. The experimental validation of this research was done with an EO sensor, which allows a remote measurement of axial and radial E-field components.

First, three-dimensional numerical simulations were performed with the Comsol Multiphysics software to find the optimal position of the EO probe for maximum sensitivity regarding internal defects position and size. Internal defects have been modeled as semi conductive cylinder and positioned according literature review.

Secondly, experimental tests were performed with a semi conductive defect at different position in a 69 kV composite insulator.

The simulation results show some important advantages when E-field axial and radial components measurement were done near the insulator housing. First, better sensitivity in defect detection has been obtained near the insulator housing. Secondly, E-field axial and radial components measurement allows E-field orientation determination along the insulator housing which can be used in internal defects detection. Finally, for the same EO probe position along the insulator, it is possible to locate precisely the defect by moving

the probe around the insulator rod. In this case, the E-field curves particular shape can be used to detect internal faults automatically.

The experimental results show that EO sensor was able to detect and locate semi conductive internal defect with length 3.5% times insulator. This is an important improvement compared to the actual device.

In summary, EO sensor used in this work can improve E-field method sensitivity. In addition, computing E-field components around insulator rod can be used to detect internal defects automatically.

Index terms: composite insulator, internal defects, electric field measurement, FEM simulations, electro-optic sensor.

Remerciements

Je tiens à adresser mes premiers mots de remerciement à mon directeur de recherche Mr Christophe VOLAT, Professeur agrégé à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Sa grande disponibilité, son soutien financier et la qualité de ses conseils m'ont permis de mener à son terme ce présent projet de recherche. Je souhaite à travers ces quelques mots lui exprimer ma profonde gratitude.

Je remercie également mon co-directeur Mr Hassan EZZAIDI, Professeur à l'UQAC pour ses judicieux conseils qui ont fortement contribué à la réalisation de ce travail de recherche.

Je tiens à remercier Mr Issouf FOFANA, Professeur à l'UQAC et titulaire de la chaire de recherche ISOLIME pour ses contributions à ce projet de recherche. Nonobstant, ses nombreuses préoccupations, il n'a ménagé aucun effort pour me prodiguer des conseils qui m'ont permis d'améliorer la qualité de mon travail.

J'adresse mes remerciements à tous mes collègues étudiants chercheurs pour leurs conseils et l'ambiance de famille qui règne au sein du laboratoire. Je veux en particulier dire un grand merci à Amidou BETIE, Simon Koutoua KASSI, Yazid HADJADJ.

Je remercie ma famille sans laquelle je ne serai pas parvenu à ce niveau de mes études.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à mon épouse, Aya Sandrine KONE pour le soutien moral et spirituel qu'elle n'a cessé de m'apporter sans oublier mes enfants Ulrich David et Grâce Esther Gbah KONE qui ont supporté l'absence de leur père.

Tables des matières

Résumé.....	ii
Abstract.....	v
Remerciements.....	vii
Tables des matières.....	viii
Listes des figures.....	xii
Liste des tableaux.....	xvi
Chapitre 1: INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1. Introduction	2
1.2. Problématique.....	3
1.3. Objectifs	6
1.4. Originalité.....	7
1.5. Méthodologie.....	8
1.5.1. Étude numérique	8
1.5.2. Validation expérimentale	9
1.6. Organisation du mémoire	10
Chapitre 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	12
2.1. Introduction	13
2.2. Les isolateurs composites	13
2.2.1. Constitution	13
2.2.2. Forces et faiblesses des isolateurs composites	15
2.3. Dégradations et modes de défaillance des isolateurs composites.....	17
2.3.1. Les contraintes électriques	17
2.3.2. Contraintes environnementales	20
2.3.3. Contraintes mécaniques	23
2.4. Les différentes méthodes de diagnostic en ligne des isolateurs composites.....	24
2.4.1. La méthode basée sur l'inspection visuelle	25
	viii

2.4.2.	La détection acoustique et UHF.....	26
2.4.3.	Thermographie Infrarouge (IR).....	27
2.4.4.	L'inspection Ultra-violet (UV)	28
2.4.5.	La mesure du champ électrique.	29
2.4.6.	Études numériques	38
2.5.	État d'avancement des travaux de détection des isolateurs défectueux par la mesure du champ électrique	40
2.6.	Conclusion	42
Chapitre 3 : ÉTUDE NUMÉRIQUE D'UN ISOLATEUR COMPOSITE 38 kV.....		43
3.1.	Introduction	44
3.1.1.	Isolateur utilisé pour les études numériques	44
3.1.2.	Positions des différents défauts internes	45
3.1.3.	Propriétés des matériaux.....	46
3.1.4.	Conditions aux limites.....	47
3.1.5.	Maillage.....	47
3.1.6.	Calcul des composantes axiale et radiale du champ électrique.....	48
3.1.7.	Méthodologie générale de détection d'un défaut interne	49
3.2.	Résultats et analyses des simulations pour les défauts internes à l'électrode H.T. et entre deux jupes (potentiel flottant)	49
3.2.1.	Comparaison des distributions de la composante axiale du champ électrique près de l'enveloppe et à l'extrémité des jupes.....	49
3.2.2.	Comparaison des distributions de la composante radiale du champ électrique près de l'enveloppe et à l'extrémité des jupes.....	52
3.3.	Exploitation des composantes axiale et radiale du champ électrique calculées simultanément près de la surface de l'enveloppe d'un isolateur.	54
3.3.1.	Détermination de l'orientation du champ électrique à la surface de l'enveloppe de l'isolateur.....	54
3.3.2.	Analyse des résultats obtenus	57
3.4.	Conclusion	57

Chapitre 4 : ÉTUDE NUMÉRIQUE D'ISOLATEURS COMPOSITES 69 kV, 115 kV et 230 kV.....	59
4.1. Introduction	60
4.1.1. Isolateurs utilisés pour les études numériques	60
4.1.2. Positions des différents défauts internes	61
4.1.3. Propriétés des matériaux.....	62
4.1.4. Conditions aux limites.....	63
4.1.5. Maillage.....	63
4.1.6. Calcul des composantes axiale et radiale du champ électrique.....	64
4.2. Simplification du modèle numérique de l'isolateur composite.....	65
4.2.1. Introduction	65
4.2.2. Analyse des résultats	66
4.3. Étude de l'influence de la taille et de la position du défaut sur les composantes axiale et radiale du champ électrique	71
4.3.1. Introduction	71
4.3.2. Méthodologie générale de détection des défauts	71
4.3.3. Analyse de résultats	72
4.4. Influence de la position de la ligne de référence par rapport au défaut.....	75
4.5. Calcul des composantes du champ électrique en des points situés le long d'une ligne circulaire centrée sur l'enveloppe de l'isolateur.....	80
4.5.1. Introduction	80
4.5.2. Analyse des résultats	80
4.6. Influence de la profondeur et du diamètre d'un défaut interne	86
4.7. Défaut de même longueur situé sur différents isolateurs composites	88
4.8. Évaluation de la section défectueuse d'un isolateur composite	90
4.9. Détection de la présence d'un chemin semi-conducteur (eau) à l'intérieur de la tige d'un isolateur composite.....	96
4.10. Influence de la présence des anneaux de garde sur le diagnostic des isolateurs composites	99
4.10.1. Introduction	99
4.10.2. Analyse des résultats	101

4.10.3. Étude de l'influence de l'anneau de garde sur l'orientation du champ à la surface de l'enveloppe.....	104
4.11. Influence de la pollution sur la détection des défauts internes.....	106
4.11.1. Introduction	106
4.11.2. Analyse des résultats	106
4.12. Conclusion	109
Chapitre 5 : VALIDATION EXPÉRIMENTALE.....	111
5.1. Introduction	112
5.2. Matériels et méthodes.....	112
5.2.1. Matériels	112
5.2.2. Déroulement des mesures.....	117
5.3. Analyse des résultats.....	119
5.3.1. Défaut interne près de l'électrode H.T.	119
5.3.2. Défaut interne au potentiel flottant.....	123
5.4. Conclusion	126
Chapitre 6 : CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS.....	128
6.1. Conclusions	129
6.1.1. Contributions des études numériques	129
6.1.2. Contributions de la validation expérimentale	131
6.2. Recommandations	132
Bibliographie.....	133

Listes des figures

Figure 1 : Image réelle (a) et vue en coupe (b) d'un isolateur composite.	13
Figure 2 : Illustration d'une décharge couronne au voisinage de l'électrode H.T. d'un isolateur composite [29].	18
Figure 3 : Dégradation due à une décharge couronne [29].	19
Figure 4 : Processus de contournement interne (<i>flashunder</i>) [30]	20
Figure 5 : Chemin conducteur à l'intérieur de la tige d'un isolateur composite résultant d'un contournement interne [29].	20
Figure 6 : Arcs partiels établis le long de bandes sèches (a) qui peut résulter en une importante fissuration de l'enveloppe (b) [29].	21
Figure 7 : Image réelle d'un contournement [29].	22
Figure 8 : Lignes équipotentiels (a) et lignes de champ électrique (b) à la triple jonction des gouttelettes d'eau [21].	22
Figure 9 : Craquelure (a) et érosion (b) à la surface d'un isolateur [29].	23
Figure 10 : Exemple de détection de défaut interne conducteur par IR [9].	28
Figure 11 : Exemple de détection de décharges partielles au voisinage de l'électrode HT par camera UV [29].	29
Figure 12 : vérificateur d'isolateur composite distribué par positron [13].	31
Figure 13 : Illustration de l'utilisation du vérificateur d'isolateurs sur un isolateur composite [13].	31
Figure 14 : Déviation maximale du champ électrique en fonction du type et de la longueur du défaut externe présent sur un isolateur composite [9].	32
Figure 15 : Prototype du capteur EO utilisé dans la détection des défauts externes conducteurs présents sur un isolateur composite [4].	34
Figure 16 : Principaux éléments de mesure d'un système de mesure EO [47].	37
Figure 17 : Modèle 3D de l'isolateur composite TPE 28 kV.	45
Figure 18 : Modèle 3D des défauts internes, défaut de 30 mm à l'électrode HT (a), défaut de 15 mm à l'électrode HT (b) et défaut de 15 mm au milieu entre deux jupes (c).	46
Figure 19 : Vue du maillage de l'isolateur composite 28 kV.	47
Figure 20 : Position de la ligne de référence pour le calcul des composantes du champ électrique à 3 mm de l'enveloppe (a) et l'extrémité des jupes (b) de l'isolateur	48
Figure 21 : Distribution de la composante axiale du champ électrique à 3 mm de l'extrémité des jupes.	50
Figure 22 : Distribution de la composante axiale du champ électrique à 3 mm de la surface l'enveloppe.	51
Figure 23 : Distribution des composantes radiales du champ électrique à 3 mm de l'extrémité des jupes.	52

Figure 24 : Distribution des composantes radiales du champ électrique à 3 mm de la surface de l'enveloppe.	53
Figure 25 : Illustration de l'orientation θ du champ électrique près de la surface de l'enveloppe.	55
Figure 26 : Orientation du champ électrique le long d'une ligne située à 3 mm de la surface de l'enveloppe de l'isolateur.	56
Figure 27 : Modèle d'un isolateur composite Sediver [55].	60
Figure 28 : Modèle 3D d'un défaut interne dans les positions : (a) position 1 (HT), (b) position 2 (potentiel flottant) et (c) position 3 (Terre).	62
Figure 29 : Vue du maillage du modèle 3D (a) et du raffinement (b).	64
Figure 30 : Illustration des points pour le calcul des composantes axiale et radiale du champ électrique.	65
Figure 31 : Modèles 3D simplifiés et complet de l'isolateur composite 69 kV.	67
Figure 32 : Composantes axiales du champ électrique du modèle 3D complet (e) et simplifié (a) de l'isolateur composite 69 kV	68
Figure 33 : Composantes radiales du champ électrique du modèle 3D complet (e) et simplifié (a) de l'isolateur composite 69 kV	69
Figure 34 : Procédure de détermination de E_d et $E_{s/d}$	72
Figure 35 : Composante axiale du champ électrique avec le défaut 1 en position 1, 2 et 3.....	73
Figure 36 : Composante radiale du champ électrique avec le défaut 1 en position 1, 2 et 3.....	73
Figure 37 : Sonde fibrée EO millimétrique [57].	76
Figure 38 : Vue de dessus de la ligne de calcul à 0° (a), 90° (b) et 180° (c) par rapport au défaut interne.....	77
Figure 39 : Composante axiale du champ électrique de l'isolateur 69 kV avec le défaut 1 en position 1.....	79
Figure 40 : Composante radiale du champ électrique de l'isolateur 69 kV avec le défaut 1 en position 1.....	79
Figure 41 : Position du défaut interne près de l'électrode HT	81
Figure 42 : Positions du défaut interne au milieu de l'isolateur (gauche) et près de l'électrode de mise à la terre (droite).	81
Figure 43 : Composante axiale du champ électrique d'un isolateur 69 kV avec et sans défaut lorsque le défaut est situé près de l'électrode H.T.	83
Figure 44 : Composante radiale du champ électrique d'un isolateur 69 kV avec et sans défaut lorsque le défaut est situé près de l'électrode H.T.	84
Figure 45 : Composante axiale du champ électrique d'un isolateur avec et sans défaut lorsque le défaut est situé au milieu de l'isolateur.	84

Figure 46 : Composante radiale du champ électrique d'un isolateur 69 kV avec et sans défaut lorsque le défaut est situé au milieu de l'isolateur	85
Figure 47 : Composante axiale du champ électrique d'un isolateur 69 kV avec et sans défaut lorsque le défaut est situé près de l'électrode de mise à la terre.....	85
Figure 48 : Composante radiale du champ électrique d'un isolateur 69 kV avec et sans défaut lorsque le défaut est situé près de l'électrode de mise à la terre.....	86
Figure 49 : Défauts internes ayant la même position (a) et la même distance avec la surface de l'isolateur (b).	87
Figure 50 : Position des défauts internes près de l'électrode H.T. et des points de calcul des composantes du champ électrique	91
Figure 51 : Composantes axiales du champ électrique pour les défauts internes près de l'électrode H.T.....	92
Figure 52 : Composantes radiales du champ électrique pour les défauts internes près de l'électrode H.T.....	92
Figure 53 : Position des défauts internes au milieu de l'isolateur et des points de calcul des composantes du champ électrique.....	93
Figure 54 : Composantes axiales du champ électrique pour les défauts internes au milieu de l'isolateur	93
Figure 55 : Composantes radiales du champ électrique pour les défauts internes au milieu de l'isolateur	94
Figure 56 : Position des défauts internes près de l'électrode de mise à la terre et des points de calcul des composantes du champ électrique.....	94
Figure 57 : Composantes axiales du champ électrique pour les défauts internes près de l'électrode de mise à la terre	95
Figure 58 : Composantes radiales du champ électrique pour les défauts internes près de l'électrode de mise à la terre	95
Figure 59 : Chemin semi-conducteur (défaut interne) près de l'électrode H.T.	97
Figure 60 : Composantes axiales de l'isolateur 69 kV sans défaut et avec défaut (chemin semi-conducteur).....	98
Figure 61 : Composantes axiales de l'isolateur 69 kV sans défaut et avec défaut (chemin semi-conducteur).....	98
Figure 62 : Exemples d'anneaux de garde [55].	99
Figure 63 : Exemple d'utilisation des anneaux de garde sur des isolateurs composites de ligne [55].	100
Figure 64 : Vue de près du modèle 3D de l'isolateur 230 kV avec un anneau de garde et défaut interne près de l'électrode HT.	101
Figure 65 : Champ électrique axial le long des 10 premières jupes à partir de l'électrode H.T. d'un isolateur 230 kV avec/sans anneau de garde.....	103

Figure 66 : Champ électrique radial le long des 10 premières jupes à partir de l'électrode H.T. d'un isolateur 230 kV avec/sans anneau de garde.....	103
Figure 67 : Illustration de l'orientation θ du champ électrique	104
Figure 68 : Champ électrique axial d'un isolateur 115 kV sans défaut pollué et non pollué.....	108
Figure 69 : Champ électrique radial d'un isolateur 115 kV sans défaut pollué et non pollué.....	108
Figure 70 : Unité optoélectronique (a) et la sonde fibrée E.O. (b) du capteur EO de Kapteos [57].	113
Figure 71 : Modèle expérimentale de l'isolateur composite 69 kV	114
Figure 72 : Différentes composantes de l'isolateur expérimental	114
Figure 73 : Défaut interne près de l'électrode H.T. (a) et au potentiel flottant (b).	115
Figure 74 : Transformateur AC 120 V / 12 kV – 720 VA.	116
Figure 75 : Système d'acquisition des données.....	117
Figure 76 : Disposition expérimentale de l'isolateur et des points de mesure	119
Figure 77 : Positions de la sonde EO pour la mesure des composantes du champ électrique des points 1 à 3	120
Figure 78 : Composante axiale du champ de l'isolateur sans défaut et défectueux pour un défaut interne à la H.T.	122
Figure 79 : Composante radiale du champ de l'isolateur sans défaut et défectueux pour un défaut interne à la H.T.	122
Figure 80 : Position de la sonde EO pour la mesure des composantes du champ électrique aux points 4, 5 et 6	123
Figure 81 : Composante axiale du champ de l'isolateur sans défaut et défectueux pour un défaut interne potentiel flottant.	124
Figure 82 : Composante radiale du champ de l'isolateur sans défaut et défectueux pour un défaut interne au potentiel flottant.	126

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques de l'isolateur composite TPE 28kV.	45
Tableau 2 : Propriétés des matériaux.....	46
Tableau 3 : Valeurs des rapports des composantes axiales du champ électrique $E_d/E_{s/d}$. ..	51
Tableau 4 : Valeurs du rapport des composantes radiales du champ électrique $E_d/E_{s/d}$	54
Tableau 5 : Valeurs du rapport $\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$ de l'orientation du champ électrique	56
Tableau 6 : Caractéristiques des isolateurs composites utilisés [55].....	61
Tableau 7 : Propriétés des matériaux.....	63
Tableau 8 : Valeurs moyennes des composantes du champ électrique dans les différentes zone de l'isolateur 69 kV	70
Tableau 9 : Valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$	74
Tableau 10 : Comparaison du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ pour la composante axiale du champ électrique calculée entre les jupes et à l'extrémité de ces dernières.	75
Tableau 11 : valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$	78
Tableau 12 : Valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$	88
Tableau 13 : Valeurs des écarts absolus maximums et du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$	89
Tableau 14 : valeurs des écarts absolus maximums e_{max} (kV/cm) en fonction de la position du défaut	102
Tableau 15 : Valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ en fonction de la position du défaut	104
Tableau 16 : Valeurs du rapport $\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$ en fonction du défaut interne	105
Tableau 17 : Valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$	107
Tableau 18 : caractéristique de l'isolateur composite expérimental 69 kV	115
Tableau 19 : Valeurs moyennes des composantes axiale et radiale du champ électrique mesurées aux points 1 à 5 pour un défaut interne à la HT.	121
Tableau 20 : Valeurs moyennes des composantes axiale et radiale du champ électrique mesurées aux points 1 à 8 pour un défaut interne au potentiel flottant.	125

Chapitre 1 :

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1. Introduction

L'énergie électrique n'est généralement pas produite à proximité immédiate des lieux d'utilisation. Il faut la transporter des centrales de production jusqu'aux consommateurs via des lignes de transmission qui sont généralement aériennes. En plus des conducteurs nus, les lignes aériennes de transport et de distribution de l'énergie électrique comportent deux autres éléments principaux : les pylônes et les isolateurs. Les isolateurs de ligne ont un rôle primordial dans la fiabilité des réseaux électriques aériens. En effet, Ils assurent le maintien et le soutien des conducteurs nus tout en fournissant en tout temps une isolation adéquate entre le conducteur et le pylône et cela quelles que soient les conditions environnementales.

Les isolateurs de ligne sont regroupés en deux grandes familles qui sont les isolateurs en céramiques et les isolateurs non-céramiques (composites) [1]. Les isolateurs en céramiques à capot et tige ont leur partie isolante en porcelaine ou en verre. Ces isolateurs offrent une grande résistance aux décharges partielles et arcs électriques ainsi qu'une excellente résistance aux agressions extérieures comme l'abrasion ou les rayonnements ultra-violets (UV). Cependant, ils présentent des inconvénients liés à leur masse, aux coûts de leur assemblage et installation, à leur fragilité sous des contraintes mécaniques et de vandalisme. Ils offrent également un comportement moyen sous des conditions de pollution atmosphérique sévères.

Les isolateurs composites, quant à eux, sont constitués d'un seul assemblage rigide constitué d'une tige centrale en fibre de verre sur laquelle est moulée l'enveloppe avec des jupes en matériau composite (silicone ou EPDM) et aux extrémités de laquelle sont fixés deux pièces d'accrochage métalliques. L'utilisation des isolateurs composites sur les lignes haute tension (H.T.) a connu une croissance exponentielle ces dernières années [2] principalement grâce aux avantages qu'ils offrent par rapport aux isolateurs en céramique. En effet, l'une des principales caractéristiques ayant fait l'attrait des isolateurs composites est leur excellente hydrophobicité de surface qui leur donne un meilleur

comportement en milieux fortement pollués. Cela implique que sous des conditions sévères de pollution atmosphérique, les isolateurs composites requièrent une longueur de fuite plus faible que leurs homologues en céramique pour le même niveau de tension, ce qui réduit la longueur totale de l'isolateur et ainsi le poids total et le coût. De plus, les isolateurs composites sont légers et présentent une résistance mécanique élevée par rapport à leur poids ainsi qu'une résistance accrue contre le vandalisme et un coût de maintenance faible [3].

Cependant l'application de la tension de service combinée aux contraintes de diverses sources (électrique, environnementale, mécanique, thermique, etc.) et leurs interactions mutuelles provoquent des dégradations externes ou internes ces derniers. Ces dégradations conduisent à long terme à une défaillance des isolateurs composites. Toute défaillance d'un seul des isolateurs présents sur une ligne aérienne entraîne non seulement une interruption de la distribution en énergie électrique, mais constitue aussi un danger pour les équipes de maintenances pendant les travaux en ligne. Il est donc important pour les compagnies exploitantes et leurs équipes de maintenance de s'assurer du bon état des isolateurs de ligne qui demeure un gage de fiabilité des réseaux électriques aériens.

Ce présent travail de recherche a pour but de contribuer au développement d'une méthode efficace permettant de détecter de manière précoce les défauts internes qui constituent la deuxième cause de défaillance des isolateurs composites.

1.2. Problématique

Après l'introduction des isolateurs composites il y a de cela environ 33 ans, il est apparu que ces derniers vieillissaient plus rapidement que leur homologue en céramique, ralentissant ainsi leur utilisation à plus grande échelle sur l'ensemble des réseaux électriques aériens à travers le monde [4]. Ce vieillissement plus rapide des isolateurs

composites constitue le principal désavantage de ces derniers. Les causes sont principalement imputables au rayonnement UV, aux contraintes mécaniques et environnementales ainsi qu'aux décharges électriques partielles. Une autre raison ayant freiné l'utilisation des isolateurs composites se trouve dans la difficulté à poser un diagnostic fiable quant à leur degré de dégradation [5]. En effet, pour les isolateurs en céramique, le diagnostic consiste à identifier l'unité défectueuse qui peut être facilement remplacée, permettant ainsi d'assurer l'intégrité du système d'isolation. Dans le cas des isolateurs composites, le problème est plus complexe puisque lorsqu'un défaut est détecté, c'est la fiabilité entière de l'isolateur qui est remise en jeu. Il faut alors un diagnostic fiable afin de décider de son remplacement ou non.

Dans le domaine du diagnostic des isolateurs de ligne, les techniques les plus couramment utilisées sont : l'inspection visuelle, la thermographie infrarouge (IR) ou ultra-violette (UV), la détection ultrasonique et la mesure du champ électrique [6]. Ces techniques ont démontré leur efficacité sur les isolateurs en céramique [7]. L'application de ces différentes méthodes aux isolateurs composites a permis de mettre en évidence la possibilité de détecter la présence des défauts conducteurs externes [5, 8-10]. Cependant, le problème devient beaucoup plus complexe lorsqu'il s'agit de détecter la présence des défauts internes au sein des isolateurs composites [11]. Les défauts internes se forment généralement entre la tige et l'enveloppe de l'isolateur au voisinage de son électrode soumise à la H.T. où l'activité des décharges partielles est la plus grande. Les défauts internes constituent la deuxième cause de défaillance des isolateurs composites [6]. Sous l'effet conjugué du champ électrique et des conditions environnementales, les défauts internes croissent au sein de l'isolateur conduisant, soit à un contournement interne (*flashunder*) complet créant un court-circuit entre la H.T. et la mise à la terre, soit à la rupture de la tige c'est à dire le lien mécanique entre le conducteur nu et le pylône.

La détection de ces défauts internes demeure à l'heure actuelle une préoccupation importante pour les compagnies exploitantes des réseaux électriques qui doit être résolu

afin d'assurer la sécurité des opérateurs pendant les travaux en ligne. À cet effet, plusieurs investigations ont été réalisées afin d'identifier la méthode la plus efficace pour détecter de manière précoce la présence des défauts internes. Parmi les méthodes de diagnostic en ligne actuelles, la mesure du champ électrique semble être la plus prometteuse en termes de détection et de localisation des défauts internes [9, 12]. L'appareil utilisé, commercialisé sous le nom de «vérificateur d'isolateurs», est un appareil initialement développé par Hydro-Québec pour tester les isolateurs en céramique [10, 12, 13]. Cependant, les différentes investigations réalisées ont mis en évidence les limites de cet appareil quant à son application aux isolateurs composites [6]. En effet, cet appareil ne mesure que la composante axiale du champ électrique à l'extrémité des jupes d'un isolateur [10]. Il ne permet pas la mesure du champ électrique entre les jupes, au plus près de l'enveloppe d'un isolateur composite où les distorsions induites par les défauts dans la distribution du champ électrique sont plus importantes [6].

Plus récemment, un nouveau capteur électro-optique (EO) de champ électrique a été développé par le laboratoire IMEP-LHAC et commercialisé par la société Kapteos [4]. Ces qualités métrologiques permettent de mesurer simultanément deux composantes perpendiculaires du champ électrique. La taille compacte de la sonde EO (quelques millimètres) et sa grande sensibilité sont des atouts qu'il est possible d'exploiter afin de mesurer localement la distorsion du champ électrique au plus près de l'enveloppe (près des défauts internes) d'un isolateur. Une étude récente réalisée par des chercheurs de l'UQAC en collaboration avec le laboratoire IMEP-LHAC avec un prototype de cet appareil EO a permis de détecter des défauts conducteurs externes de petites tailles présents sur les isolateurs composites [4]. Cependant, des investigations supplémentaires, aussi bien numériques qu'expérimentales, doivent être entreprises dans le but de déterminer la sensibilité du capteur EO pour la détection et la localisation des défauts internes présents au sein des isolateurs composites.

1.3. Objectifs

Bien que plusieurs techniques aient été proposées pour évaluer l'état des isolateurs composites, il est encore difficile de détecter efficacement et de manière précoce la présence des défauts internes. D'après la revue de la littérature, la méthode de diagnostic basée sur la mesure du champ électrique semble être la plus prometteuse [1]. Le développement et la commercialisation récente d'un nouveau type de capteur électro-optique (EO) a permis d'améliorer la sensibilité de cette méthode pour la détection des défauts externes [4]. L'objectif général de cette recherche est de poursuivre l'application de ce capteur EO pour la détection des défauts internes présents au sein des isolateurs composites. A cet effet, des investigations numériques sont proposées pour étudier l'influence des défauts internes présents au sein des isolateurs composites sur les composantes axiale et radiale du champ électrique.

Afin de contribuer au développement d'une nouvelle méthode de détection des défauts internes basée sur la mesure EO du champ électrique, plusieurs objectifs spécifiques doivent être atteints :

- Déterminer numériquement l'influence des caractéristiques d'un défaut interne (taille et position) sur les différentes composantes du champ électrique (composantes axiale et radiale).
- Vérifier numériquement l'intérêt d'utiliser l'orientation du champ électrique à la surface de l'enveloppe comme outils de détection des défauts internes.
- Étudier numériquement l'influence des caractéristiques d'un défaut interne en fonction de la longueur de l'isolateur composite.
- Étudier numériquement l'influence de la présence d'un anneau de garde sur la détection d'un défaut interne en mesurant les composantes du champ électrique près de l'enveloppe d'un isolateur.
- Valider expérimentalement les différents résultats numériques à l'aide du nouveau capteur EO et d'un modèle simplifié d'isolateur composite défectueux.

Les résultats obtenus constitueront des axes de réflexions à approfondir pour apporter des améliorations significatives au diagnostic des isolateurs composites par la mesure du champ électrique.

1.4. Originalité

Les défauts internes représentent la deuxième cause de dégradation des isolateurs composites. De plus, étant difficilement identifiables par les méthodes actuelles, ces défauts constituent un danger aussi bien pour le personnel de maintenance que pour la fiabilité des réseaux électriques. Le but de cette recherche est de proposer une amélioration de la méthode de diagnostic des isolateurs composites basée sur la mesure du champ électrique avec l'utilisation d'un capteur EO qui permet de mesurer deux composantes perpendiculaires du champ électrique.

Aux meilleurs de nos connaissances, ce capteur EO n'a encore fait l'objet d'aucune application à la détection des défauts internes au sein des isolateurs composites. L'originalité de cette étude réside dans deux aspects qui peuvent être décrits comme suit :

- L'application du capteur EO à la détection des défauts internes au sein des isolateurs composites par une mesure simultanée, ponctuelle et non-intrusive des composantes axiale et radiale du champ électrique en tout point situé le long de l'enveloppe d'un isolateur composite.
- L'étude numérique des différents paramètres qui influencent les distributions des composantes axiales et radiales du champ électrique en fonction des caractéristiques d'un défaut interne (taille et position), de la longueur de l'isolateur, de la présence d'anneau de garde ou de pollution et de la position de la ligne de calcul des composantes du champ par rapport au défaut interne.

1.5. Méthodologie

Pour l'atteinte des objectifs de ce travail de recherche, des études numériques et expérimentales ont été réalisées. Chacune d'elles se déroule suivant une méthodologie dont les différentes étapes sont décrites ci-après.

1.5.1. Étude numérique

Cette partie porte sur une étude exhaustive de l'influence de la présence d'un défaut interne (taille et position) au sein d'un isolateur composite sur les composantes axiale et radiale du champ électrique. La méthodologie proposée comprend principalement les étapes suivantes :

Étape 1 : Développement des modèles 3D d'isolateurs composites défectueux.

Il s'agit de construire les différents modèles numériques tridimensionnelles d'isolateurs composites défectueux. La modélisation tridimensionnelle (3D) a été utilisée pour représenter correctement l'influence d'un défaut interne sur la distribution du champ électrique le long d'un isolateur composite [14]. La modélisation du défaut interne est principalement basée sur les données extraites de la littérature. Les modèles numériques et les modélisations associées ont été réalisés avec le logiciel commercial d'éléments finis COMSOL Multiphysics 4.3.a.

Étape 2 : Simulations numériques 3D pour déterminer l'influence des caractéristiques du défaut interne et de l'isolateur composite.

Cette étape est incontournable puisqu'elle permet de valider plusieurs concepts à savoir :

- L'influence d'un défaut interne sur les composantes axiale et radiale du champ électrique et son orientation.
- L'influence des caractéristiques de l'isolateur à savoir sa longueur, la présence d'anneau de garde et de pollution.

Tous les défauts internes ont été modélisés sous la forme d'un cylindre ayant des longueurs différentes comprises entre 3,5% et 7% de la longueur totale de l'isolateur utilisé. Le choix des longueurs des défauts internes est basé sur les résultats des travaux antérieurs [4, 15]. Les défauts internes ont été positionnés à proximité de l'électrode H.T. conformément à la majorité des cas rapportés [16, 17], au milieu de l'isolateur (potentiel flottant) et au voisinage de l'électrode de mise à la terre. Pour chacune des positions, le défaut interne est situé entre la tige et l'enveloppe de l'isolateur ou à l'intérieur de la tige comme observé dans les cas pratiques [5, 16, 17].

1.5.2. Validation expérimentale

Cette partie porte sur la validation à l'aide de mesures expérimentales, des résultats issus de l'étude numérique. Les mesures ont été réalisées avec un capteur EO et un modèle expérimental d'isolateur composite qui a été spécifiquement développé à cet effet. La méthodologie adoptée dans ce cas comprend les étapes suivantes :

Étape 1 : Développement d'un modèle expérimental simplifié d'isolateur composite défectueux

Il s'agit ici de développer un modèle permettant de simuler expérimentalement un isolateur composite avec un défaut interne. Actuellement, il est difficile de créer des défauts internes au sein d'un isolateur composite réel puisque cela résulte d'un processus long et erratique lié aux conditions de fabrication et de service. Ainsi, il a été décidé de recréer un isolateur composite au sein duquel sera introduit le défaut interne. Le modèle de l'isolateur composite expérimental reprend les différentes composantes d'un isolateur réel à savoir : une tige (en nylon), une enveloppe avec des jupes (téflon) et deux électrodes métalliques (en aluminium). L'ensemble est démontable ce qui permet d'insérer facilement le défaut interne. Le défaut interne a été simulé par un morceau de ruban semi-conducteur.

Étape 2 : Étude expérimentale avec un prototype d'isolateur défectueux et validation des résultats

Cette étape essentielle consiste à effectuer des mesures expérimentales avec le capteur EO et le prototype d'un isolateur composite défectueux. Les mesures ont été ensuite comparées aux résultats issus des simulations numériques. L'analyse des différents résultats obtenus permet de déterminer la sensibilité du capteur pour la détection des défauts internes.

1.6. Organisation du mémoire

Ce présent mémoire qui est le condensé de tous les travaux réalisés dans le cadre de ce projet de recherche comprend cinq (6) chapitres.

Le premier chapitre traite de la problématique de ce travail de recherche et des objectifs qu'il vise.

Le deuxième chapitre est consacré à la revue de la littérature. Il commence par la présentation des isolateurs composites, des dégradations et modes de défaillance de ces derniers en mettant un accent particulier sur l'origine des défauts internes et leurs conséquences. Ensuite, les différentes méthodes de diagnostic en ligne des isolateurs composites et les limites de chaque méthode sont présentées. L'état d'avancement des travaux liés à notre problématique termine les notions discutées dans cette partie.

Le troisième chapitre présente les résultats numériques de l'influence des caractéristiques des défauts internes (position et taille) sur les composantes axiale et radiale du champ électrique le long d'un isolateur composite TPE (Thermoplastique Élastomère) 28 kV utilisé dans le domaine de la distribution de l'énergie électrique.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude numérique de l'influence de la taille et de la position des défauts internes sur les composantes axiale et radiale du champ électrique. En outre, il comporte l'influence de la pollution, de la présence d'anneau de garde, de la profondeur du défaut interne et de la position de la ligne de référence sur le diagnostic des isolateurs composites. Pour cette étude, des isolateurs composites employés dans le domaine du transport de l'énergie électrique ont été utilisés car sujets à plus de défauts internes que les isolateurs composites de distribution.

Le cinquième chapitre regroupe les résultats expérimentaux et leur validation. Les mesures réalisées concernent l'étude de l'influence de la présence d'un défaut interne (taille et position) sur les composantes axiale et radiale du champ électrique le long d'un prototype d'isolateur composite utilisé dans le domaine du transport de l'énergie électrique.

Enfin, le chapitre six présente les conclusions et recommandations pour des travaux futurs qui découlent de cette étude.

Chapitre 2 :

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1. Introduction

Cette partie présente certaines notions dont la compréhension est nécessaire pour la réussite de ce projet de recherche. Elle commence par la présentation des isolateurs composites puis traite des dégradations et modes de défaillance des isolateurs composites en mettant un accent particulier sur l'origine des défauts internes et leurs conséquences. Ensuite, les différentes méthodes de diagnostic en ligne des isolateurs composites seront présentées. L'état d'avancement des travaux de recherche liés au diagnostic des isolateurs composites par la mesure du champ électrique termine les notions discutées dans cette partie.

2.2. Les isolateurs composites

2.2.1. Constitution

Un isolateur composite est fondamentalement constitué de trois (3) éléments principaux (figure 1) qui sont : la tige (partie centrale de l'isolateur), une enveloppe entourant la tige qui comporte les ailettes (ou jupes) et deux (2) pièces métalliques aux extrémités.

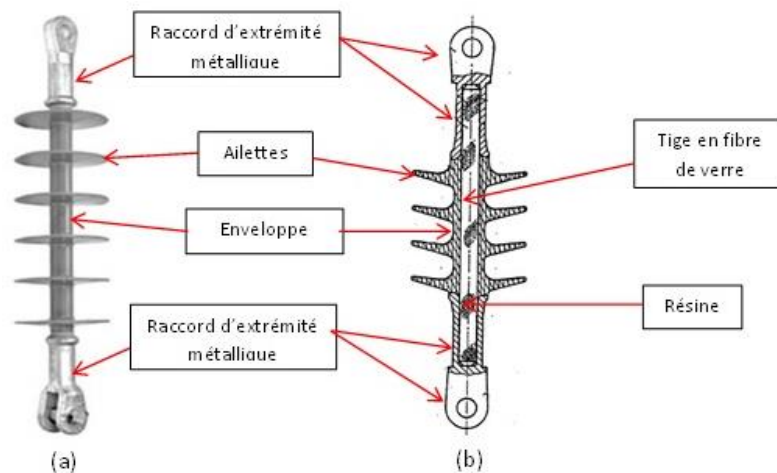


Figure 1 : Image réelle (a) et vue en coupe (b) d'un isolateur composite.

2.2.1.1. La tige

La tige est la partie centrale de l'isolateur qui assure à la fois l'isolation électrique et la liaison mécanique entre le conducteur nu et le pylône. Elle est constituée de résine époxy renforcée de fibres de verre pour fournir la résistance mécanique appropriée [18]. Les résines époxy offrent de meilleures propriétés électriques que les résines de polyester qui sont appliquées dans certains cas pour réduire les coûts.

En dépit de leur fonction de protéger la fibre de verre contre l'infiltration d'eau pouvant provoquer des microfissures, les propriétés de la résine changent avec le temps et sont affectées par la température. En effet, l'infiltration d'eau diminue la résistivité des fibres de verre conduisant à des décharges partielles internes qui entraînent à long terme une défaillance mécanique de l'isolateur composite.

2.2.1.2. Les pièces d'accrochage métalliques

Elles sont fixées aux deux extrémités de la tige pour lui transmettre les charges mécaniques. Les matériaux plus communément utilisés sont : la fonte, l'aluminium forgé ou usiné, le fer et l'acier forgé [7]. La forme des pièces d'accrochage constitue un facteur important dans la limitation des décharges couronnes qui entraînent une dégradation prématurée de l'enveloppe de l'isolateur.

2.2.1.3. L'enveloppe

Moulée autour de la tige, l'enveloppe (qui comprend des jupes) permet de créer la ligne de fuite nécessaire afin d'assurer l'isolation électrique adéquate entre le conducteur nu et le pylône. L'enveloppe permet aussi de protéger la tige contre les agressions extérieures (infiltration d'eau, rayonnement ultra-violet et décharges partielles).

Durant des années, différents matériaux polymères ont été utilisés dans la fabrication de l'enveloppe afin de lui conférer en priorité des propriétés hydrophobes. De telles propriétés permettent à l'isolateur d'avoir un meilleur comportement sous des conditions

de pollution atmosphérique et sous la pluie, ce qui représente l'un des principaux avantages des isolateurs composites comparés à ceux en céramique. Parmi les matériaux les plus utilisés, on retrouve l'Éthylène Propylène Diène Monomère (EPDM) et le caoutchouc de Silicone RTV (vulcanisation à température ambiante) ou HTV (vulcanisation à haute température).

L'EPDM offre de bonnes propriétés mécaniques et une haute résistance aux dégradations induites par les rayonnements ultra-violet et l'ozone [19]. Les résultats expérimentaux publiés par V. M. Moreno et al. [20] indiquent que les isolateurs composites EPDM subissent moins d'impact dans un test à l'érosion de surface que d'autres matériaux polymères, y compris le caoutchouc de silicone.

Le caoutchouc de silicone RTV ou HTV est constitué de polymères ayant une molécule d'atome alternée de silicium et d'oxygène. Il a une résistance à la pollution supérieure à celle de l'EPDM mais présente une faible résistance à la traction. Grâce à sa capacité à transférer sa caractéristique hydrophobe à la surface de la couche de pollution dans des sites fortement pollués, la couche de pollution se comporte alors comme une surface de caoutchouc de silicone en devenant hydrophobe, ce qui empêche l'eau de former un film continu [21]. Aucun autre matériau polymère ne montre cette propriété. Les isolateurs composites avec le revêtement extérieur en caoutchouc de silicone sont les plus utilisés.

2.2.2. Forces et faiblesses des isolateurs composites

2.2.2.1. Forces

Les raisons de l'utilisation massive des isolateurs composites varient considérablement entre les fournisseurs d'énergie électrique, mais les plus courantes peuvent se résumer comme suit [5, 7, 22] :

- Un bon comportement dans les zones de pollutions naturelles ou industrielles sévères de part une excellente hydrophobicité de la surface de l'enveloppe;

- une masse d'environ 10 fois inférieure à celle d'un isolateur en verre ou céramique pour la même tension nominale de ligne, permettant ainsi de réduire les coûts;
- un coût d'installation faible (simplification du montage d'une chaîne d'isolateurs et de leur installation);
- une Résistance élevée à la rupture pour des efforts mécaniques longitudinaux.

Malgré leurs nombreux avantages, les isolateurs composites présentent aussi quelques faiblesses dont les plus pertinentes sont soulignées dans la section suivante.

2.2.2.2. Inconvénients

L'amélioration de la technologie de fabrication et le contrôle de qualité stricte ont permis d'améliorer substantiellement la fiabilité des isolateurs composites entraînant une augmentation de leur compétitivité par rapport aux isolateurs classiques. Toutefois, les isolateurs composites ont encore quelques faiblesses. Parmi celles-ci, il convient de relever les points suivants :

- ils doivent être manipulés avec précaution pendant le transport et les opérations d'assemblage afin de ne pas endommager la surface de l'enveloppe et ainsi diminuer ses caractéristiques diélectriques et hydrophobes;
- ils ont besoin de condition de stockage adéquate;
- le caoutchouc de silicone étant sensible aux attaques de champignons, leur dépôt sur la surface de l'isolateur, en zone humide, conduit à la rétention d'eau en surface qui compromet ses caractéristiques hydrophobiques;
- la masse réduite de l'isolateur composite favorise le balancement des conducteurs sous l'action du vent;
- la tige en fibre de verre peut se fracturer sous l'action des contraintes mécaniques et électriques.

2.3. Dégradations et modes de défaillance des isolateurs composites

Les isolateurs composites sont soumis au cours de leur durée de vie à diverses contraintes combinées qui provoquent des dégradations plus ou moins irréversibles. Ces contraintes peuvent être regroupées en trois catégories principales : électriques, mécaniques et environnementales [23]. Sous l'action de ces contraintes et en raison de leurs faibles liaisons organiques, les matériaux polymères utilisés sont vulnérables aux agressions chimiques et aux rayonnements, ce qui entraînent des dégradations de la surface des isolateurs composites et leur vieillissement prématuré [24].

2.3.1. Les contraintes électriques

Les performances électriques des isolateurs composites en H.T. dépendent des distributions du champ électrique le long de ces derniers. Un champ électrique élevé et non uniforme peut conduire à l'apparition de décharges électriques partielles (décharge couronne, arc de bande sèche, etc.).

Décharges couronnes

La répartition du champ électrique le long d'un isolateur composite est généralement non uniforme avec l'amplitude la plus élevée à proximité de l'électrode H.T.[25, 26]. La zone située à proximité de la H.T. est donc la plus propice à l'apparition des décharges couronnes (figure 2). Une décharge couronne se produit à la surface de l'isolateur lorsque l'intensité du champ électrique dépasse une certaine valeur dépendamment des facteurs géométriques et environnementaux. Les décharges couronne génèrent un rayonnement UV (longueurs d'onde comprise entre 230-405 nm), des ultrasons, de la chaleur, de l'ozone et de l'acide nitrique [27].

L'acide nitrique est particulièrement nocif pour l'enveloppe puisqu'il peut provoquer l'érosion de cette dernière. L'activité intermittente des décharges peut percer (figure 3-a) l'enveloppe de l'isolateur jusqu'à la tige, créant ainsi un canal propice à l'infiltration d'eau.

La création de ce canal et l'infiltration d'eau qui en découle entraîne généralement la formation d'un chemin conducteur interne à l'interface tige-enveloppe de l'isolateur conduisant ainsi à la création d'un défaut interne. Ce type de défaut peut donner naissance, sous certaines conditions qui sont expliquées plus en détail dans les pages suivantes, à un contournement interne (*flashunder*).

Dans des cas plus extrêmes, l'activité soutenue des décharges couronnes au voisinage de l'électrode H.T. produit une quantité importante de chaleur et d'acide nitrique qui peut conduire à une destruction importante de la jupe, tel que présenté à la figure 3-b [28]. Cependant, ce type de défauts visibles n'affectent que très peu l'intégrité de l'isolateur tant que la tige n'est pas touchée ou exposée à l'air libre.

Les décharges couronnes au voisinage de l'électrode H.T. sont généralement présentes en tout temps et résultent d'une géométrie inadéquate de la pièce d'accrochage portée à la H.T. ou de l'absence d'anneaux de garde qui permettent une réduction importante du champ électrique [25].



Figure 2 : Illustration d'une décharge couronne au voisinage de l'électrode H.T. d'un isolateur composite [29].

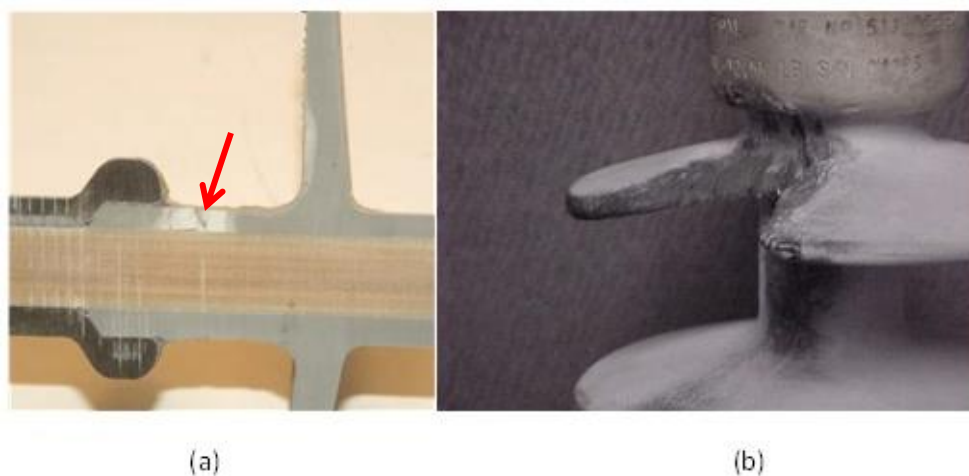


Figure 3 : Dégradation due à une décharge couronne [29].

✚ **Contournement interne (*flashunder*)**

Les activités intermittentes de décharge électrique (figures 2) peuvent perforer l'enveloppe de l'isolateur (figure 3-a) jusqu'à la tige, créant ainsi un canal propice à l'infiltration d'eau. La création de ce canal et l'infiltration d'eau qui en découle entraîne généralement la formation d'un chemin conducteur entre la surface de l'enveloppe de l'isolateur et son interface avec la tige. Il en résulte une augmentation localisée du champ électrique à l'extrémité de ce chemin conducteur et l'apparition de décharges partielles qui vont contribuer à l'extension du chemin conducteur à l'intérieur de l'isolateur. Ce chemin conducteur peut se créer à l'interface entre l'enveloppe et la tige ou encore à l'intérieur de la tige. Lorsque le chemin atteint une certaine longueur, un contournement (figure 4) peut se produire et ainsi endommager définitivement l'isolateur, comme le présente la figure 5. En outre ce chemin conducteur fragilise la tige par la diminution de sa résistance mécanique. Ceci peut, non seulement entraîner la chute du conducteur nu, mais constituer un danger pour la sécurité des opérateurs pour les travaux en ligne sur les réseaux électriques.

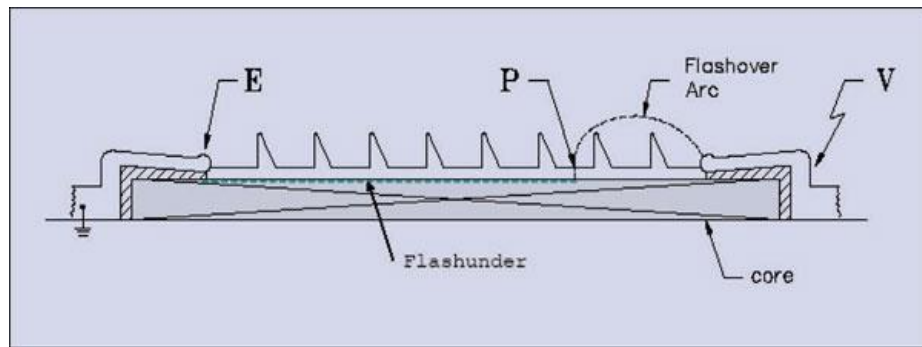


Figure 4 : Processus de contournement interne (*flashunder*) [30]

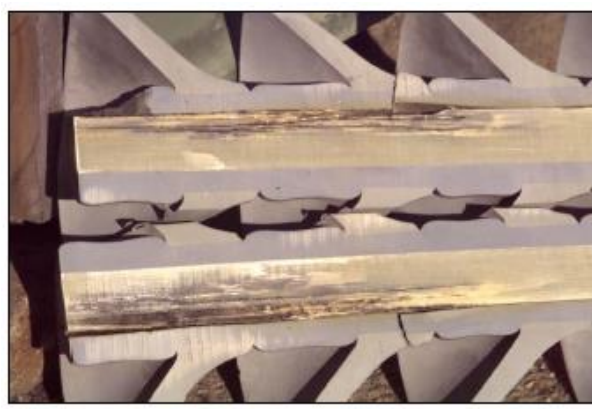


Figure 5 : Chemin conducteur à l'intérieur de la tige d'un isolateur composite résultant d'un contournement interne [29].

2.3.2. Contraintes environnementales

✚ La pollution

Sous des conditions combinées de pollution atmosphérique et de pluie, de brouillard ou de rosée, la formation d'une couche d'électrolyte conductrice à la surface de l'isolateur conduit à la circulation d'un courant de fuite le long de ce dernier. L'effet Joule qui en résulte conduit à l'évaporation de l'eau et au séchage de la surface de l'isolateur. Des bandes sèches se forment dans les zones où la densité de courant et la puissance dissipée sont les plus importantes [31]. Il s'ensuit une importante chute de tension aux bornes des

bandes sèches ainsi créées. Si cette dernière est suffisante, cela peut entraîner l'apparition d'arc électrique partiel résultant du claquage des bandes sèches, tel qu'illustré à la figure 6-a. Si la décharge s'éteint, il n'y a pas de contournement. Dans le cas contraire, elle progresse pour joindre d'autres décharges électriques conduisant alors à un contournement complet (figure 7) de l'isolateur [32]. La présence des arcs partiels entre les ailettes présentent un danger potentiel pour l'isolateur (figure 6-b).

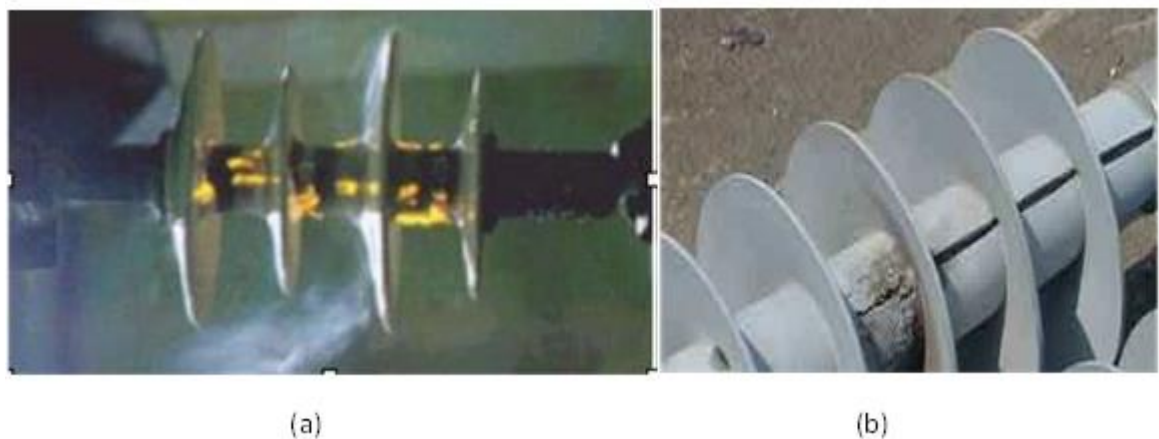


Figure 6 : Arcs partiels établis le long de bandes sèches (a) qui peut résulter en une importante fissuration de l'enveloppe (b) [29].

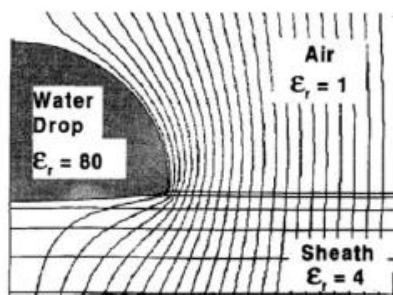
En outre, sous conditions de pluie, en plus des décharges couronnes présentes au voisinage de la H.T, les gouttelettes d'eau présentes à la surface d'un isolateur entraîne une augmentation localisée du champ électrique [33]. Les figures 8-a et 8-b montrent respectivement des exemples de lignes équipotentielles et de distribution du champ électrique qui mettent en exergue la région où le champ électrique est intense (à la triple jonction eau-air-enveloppe). Si le champ électrique est suffisamment élevé, des décharges partielles aléatoires peuvent s'initier sur la surface de l'isolateur. Ces activités intenses et continues de décharges peuvent détruire l'hydrophobicité et conduire progressivement au cheminement et à l'érosion de la surface de l'enveloppe et de ses jupes, comme le montre la figure 9.



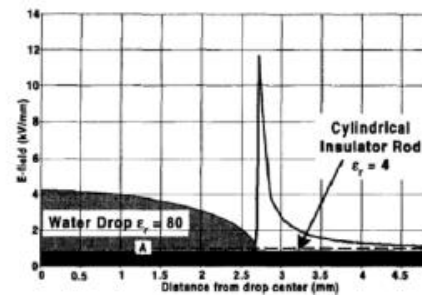
Figure 7 : Image réelle d'un contournement [29].

Dans des expériences à l'échelle macroscopique, les premiers signes de dégradations dues à des décharges électriques ont été des craquelures de la surface ($< 5 \mu\text{m}$ de profondeur), la fissuration ($> 50 \mu\text{m}$ de profondeur) et la décoloration [28].

Dans d'autres cas, l'érosion induite par les décharges partielles générées par la présence des gouttes d'eau peut conduire à la perforation de l'enveloppe. Si cette perforation se situe entre les ailettes au niveau de la tige, un chemin conducteur peut ainsi naître entre l'enveloppe de l'isolateur et la tige, donnant ainsi naissance à un défaut interne.



(a)



(b)

Figure 8 : Lignes équipotentielles (a) et lignes de champ électrique (b) à la triple jonction des gouttelettes d'eau [21].

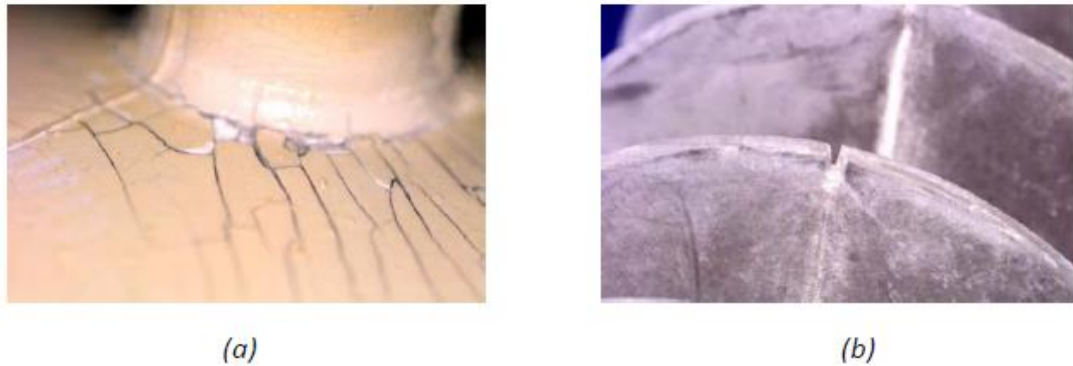


Figure 9 : Craquelure (a) et érosion (b) à la surface d'un isolateur [29].

Rayonnement ultra-violet (UV)

Les isolateurs composites installés à l'extérieur sont soumis aux rayonnements (UV) du soleil. Les surfaces sont alors attaquées par des photons UV qui libèrent l'énergie nécessaire pour pouvoir briser les liaisons moléculaires [34, 35]. En outre, l'enveloppe en matériau polymère des isolateurs composites contient des impuretés telles que les agents de vulcanisation, des catalyseurs et des charges qui sont vulnérables aux rayonnements UV en raison de leur faible liaison moléculaire. La présence de ces additifs affaiblit le polymère solide à base de carbone, réduisant ainsi la résistance de l'enveloppe aux rayons UV. La chaleur et la photo-oxydation provoquent des ruptures de chaînes détruisant l'hydrophobie de la surface de l'enveloppe, ce qui conduit à la fissuration et à la dégradation du matériau polymère. Les effets des radiations UV sur les isolateurs composites sont le faïençage, le farinage ou la fissuration de la surface (figure 9-a), la décoloration et la perte de l'hydrophobicité.

2.3.3. Contraintes mécaniques

La fonction principale d'un isolateur est de supporter le conducteur nu qui exerce une contrainte mécanique constante à cause de son poids pouvant atteindre jusqu'à plusieurs tonnes pour les lignes électriques très haute tension.

Au fil du temps, la charge peut progressivement affaiblir le joint entre le noyau et les pièces d'extrémités, conduisant à une défaillance mécanique de l'isolateur. En outre, une contrainte mécanique supplémentaire peut également se développer lorsque de forts vents provoquent l'oscillation des conducteurs de phase. Les vibrations qui en découlent peuvent provoquer la formation de fissures à l'interface entre la tige et les pièces d'accrochage métalliques. Également, dans certains pays à climat froid, l'accumulation de glace sur les conducteurs de phase et les lignes peuvent générer des contraintes de poids supplémentaire sur les isolateurs. Enfin, dans les régions désertiques chaudes, la température moyenne peut facilement atteindre 40°C pendant la journée et descendre en dessous de 10°C la nuit. Ce changement considérable de température entraîne un processus de dilatation thermique cyclique et de contraction qui peut desserrer la connexion entre le noyau et les pièces métalliques d'extrémités, affectant la résistance mécanique de l'isolateur.

2.4. Les différentes méthodes de diagnostic en ligne des isolateurs composites

L'objectif du diagnostic est, en général, d'obtenir des informations pertinentes sur l'état de dégradation des isolateurs composites lorsque ces derniers sont en service. Les équipes de maintenance installent et remplacent régulièrement des isolateurs composites sur les lignes aériennes de transport de l'énergie électrique. Une condition essentielle pour assurer la sécurité des opérateurs est de confirmer l'intégrité mécanique et électrique de l'isolateur avant d'effectuer les travaux en ligne. Ces équipes de maintenance ont besoin de méthodes simples et économiques pour détecter les défauts sur les isolateurs. Ces défauts doivent ensuite être classés et analysés en fonction de leur probabilité à causer une défaillance catastrophique pendant l'exécution des travaux sous-tension.

Dans ce contexte, les méthodes de diagnostic utilisées doivent en premier lieu être transportables afin de pouvoir prodiguer aux équipes de maintenance des informations

pertinentes sur les isolateurs accrochés au pylône. Dans un second temps, les méthodes de diagnostic doivent pouvoir être utilisables dans un environnement H.T. tout en assurant la sécurité des utilisateurs par une isolation galvanique appropriée. Ces deux contraintes limitent donc le choix des méthodes d'inspection utilisables sur sites.

Les méthodes les plus utilisées pour diagnostiquer en ligne l'état de dégradation des isolateurs composites sont les suivantes [17].

- l'inspection visuelle et l'analyse de l'hydrophobie;
- la détection acoustique et UHF (Ultra Haute Fréquence);
- la thermographie I.R. (infra-rouge);
- l'inspection U.V. (Ultra-Violet);
- la mesure du champ électrique.

2.4.1. La méthode basée sur l'inspection visuelle

L'inspection visuelle est la technique la plus simple et la plus utilisée par les opérateurs pour identifier en ligne les défauts sur les isolateurs composites [3]. Elle peut être effectuée à distance à l'aide de jumelles et de télescopes ou au plus près de l'isolateur afin de pouvoir l'inspecter minutieusement sous tous ses angles. L'inspection visuelle permet de détecter principalement les défauts ou détériorations apparents présents sur l'isolateur, qui peuvent se résumer comme suit :

- détérioration de la surface de l'isolateur (craquelure, érosion, faïençage, etc.);
- perforation de l'enveloppe au niveau de la tige;
- défauts d'étanchéité;
- exposition de la tige et/ou érosion;
- défauts internes présentant des signes extérieurs.

Bien que l'inspection visuelle permette de détecter la plupart des défauts externes d'une certaine taille, les défauts internes qui pourraient conduire à une fracture de la tige sont indétectables. En outre, l'inspection visuelle peut généralement fournir des informations plutôt qualitatives qui doivent être mieux quantifiées par les autres méthodes de diagnostic examinées dans les sections suivantes. Également, elle nécessite un inspecteur expérimenté ayant une bonne connaissance des isolateurs et leurs modes de défaillance.

2.4.2. La détection acoustique et UHF

En plus d'émettre des rayonnements U.V., les décharges couronne émettent des rayonnements ultrasoniques dans la gamme de fréquence située entre 20 kHz et 300 kHz ainsi que des rayonnements électromagnétiques à des fréquences beaucoup plus élevées situées entre 100 MHz et 1,5 GHz .

La mesure des ultrasons est simplement réalisée avec des capteurs ultrasoniques, qui équipés de paraboles, permettent de détecter la présence de décharges couronnes à des distance allant jusqu'à 100 m, permettant ainsi d'effectuer des inspections à distance et sécuritaires. Cependant, malgré la directivité de ces capteurs paraboliques, il est difficile de localiser précisément les défauts responsables des décharges couronnes le long de l'isolateur défectueux [6, 7]. De plus, ces capteurs permettent de détecter difficilement les défauts internes puisque dans ce cas précis, les émissions ultrasoniques sont fortement atténuées par l'enveloppe de l'isolateur. Enfin, les capteurs ultrasoniques sont sensibles aux bruits environnants qui peuvent nuire à la détection des décharges couronnes de faibles intensités [6].

Les rayonnements UHF émis par les décharges couronnes sont détectés à l'aide d'antennes UHF et présentent l'avantage de s'affranchir des bruits environnants qui se situent plus dans la gamme des fréquences ultrasoniques. Cependant, les rayonnements UHF présentent l'inconvénient d'être fortement atténué lors de leur propagation dans l'air. Par conséquent, les antennes UHF doivent être généralement placées proche de la

source émettrice, ce qui limite considérablement la distance de détection par rapport aux émissions ultrasoniques [7]. En outre, tout comme les capteurs ultrasoniques, les antennes UHF permettent difficilement de localiser les défauts internes en raison de l'atténuation produite par l'enveloppe de l'isolateur qui perturbe significativement le mode d'émission des décharges couronnes.

2.4.3. Thermographie Infrarouge (IR)

La thermographie IR basée sur l'utilisation de caméra performante permet de détecter et de localiser les points chauds générés par des élévations anormales et localisées de température. Ces points chauds sont généralement causés par la circulation d'un courant de fuite le long de l'isolateur qui met en évidence les parties défectueuses qui sont plus conductrices, tel qu'illustré à la figure 10 [4, 17].

La détection des points chauds par thermographie IR est particulièrement évidente lorsque des défauts conducteurs internes ou externes de grandes tailles sont présents. En plus, la surface de l'isolateur doit être partiellement conductrice sous des conditions environnementales propices (comme la pluie, le brouillard ou une pollution légère humide). Ces conditions permettent ainsi au courant de fuite de circuler le long de l'isolateur [6, 17]. Enfin, les avancées technologiques réalisées dans les caméras IR permettent d'appliquer la thermographie IR à distance, soit à partir du sol ou d'hélicoptère, ce qui simplifie et accélère grandement l'inspection tout en assurant la sécurité des équipes de maintenance.

Cependant, lorsque la surface de l'isolateur est sèche et en présence de petits défauts, le courant de fuite n'est pas assez important pour générer une élévation de température détectable. Par conséquent, ces défauts ne peuvent pas être mis en évidence [6]. Cela limite donc l'utilisation de la thermographie IR qui doit être employée dans des conditions environnementales particulières lorsque des défauts importants sont présents [6, 17]. Enfin, l'interprétation des résultats de la thermographie IR peut être affectée par les

conditions environnementales (vents violents, rosée, pollution, changements rapides de température) pouvant ainsi biaiser le diagnostic obtenu [12].

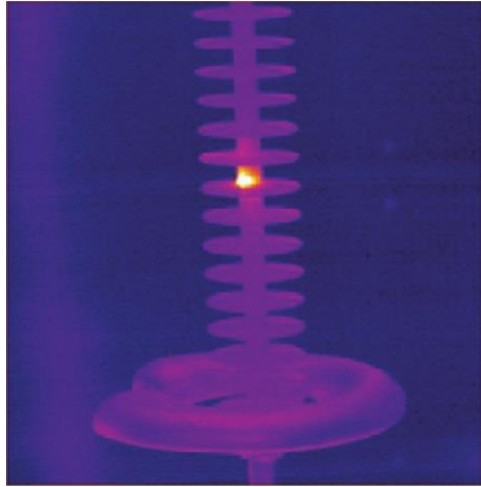


Figure 10 : Exemple de détection de défaut interne conducteur par IR [9].

2.4.4. L'inspection Ultra-violet (UV)

L'inspection UV est basée sur l'utilisation de caméras spécifiques qui permettent de détecter les émissions UV générées par des activités de décharge couronne le long des isolateurs. En effet, les décharges couronnes émettent dans une bande spectrale située entre 230 et 405 nm [27]. La majorité des caméras utilisées sont sensibles aux longueurs d'ondes inférieures à 280 nm [36], ce qui leur permet de détecter les décharges couronnes en s'affranchissant de l'influence des longueurs d'ondes de la lumière solaire situées entre 300 et 400 nm. En outre, ces caméras disposent d'une technologie permettant de superposer l'image UV et l'image réel pour mieux localiser les décharges partielles, tel qu'illustré à la figure 11. L'inspection UV est particulièrement efficace pour la détection des décharges partielles générées par les défauts conducteurs ou semi-conducteurs externes qui se développent sur une partie de l'isolateur, en particulier dans des conditions sèches [17]. L'inspection UV est une solution complémentaire à la

thermographie IR lorsque la surface de l'isolateur est sèche. Tout comme la thermographie IR, le développement de nouvelles caméras UV performantes permettent de réaliser des inspections à distance, soit à partir du sol ou d'hélicoptère, assurant ainsi une inspection plus rapide et sécuritaire. L'inspection UV est généralement capable de détecter tous les défauts conducteurs de longueur supérieure de 20 à 30% de la longueur totale de l'isolateur [37]. Également, elle ne permet que la détection des défauts internes débouchant sur l'extérieur [15].



Figure 11 : Exemple de détection de décharges partielles au voisinage de l'électrode H.T. par camera UV [29].

2.4.5. La mesure du champ électrique.

La méthode de diagnostic des isolateurs par la mesure du champ électrique a été initialement développée pour détecter les isolateurs défectueux en porcelaine ou en verre [16]. Son principe est basé sur le fait que tout défaut conducteur ou semi-conducteur situé le long d'un isolateur entraîne une distorsion locale dans la distribution du champ électrique le long de l'isolateur. En détectant cette distorsion qui se situe en générale dans la zone où se trouve le défaut, il devient alors possible de localiser précisément ce dernier. Cette méthode implique la mesure de la distribution du champ électrique le long de

l'isolateur en utilisant un appareil portable et sécuritaire qui présente une excellente sensibilité.

2.4.5.1. Le vérificateur d'isolateurs

Dans le but d'exploiter et d'appliquer la méthode de détection basée sur la mesure du champ électrique, des chercheurs d'Hydro-Québec ont développé, dans les années 90, un appareil spécialement dédié à l'inspection des isolateurs en porcelaine et en verre [12, 16, 33]. Son principe de fonctionnement est assez simple et réside dans l'utilisation d'un condensateur formé de deux plaques diélectriques qui permet de mesurer la composante axiale du champ électrique en alternatif exclusivement le long des extrémités des jupes d'un isolateur. Cet appareil, disponible commercialement sous le nom de «*vérificateur d'isolateurs*» et distribué par la société Positron existe en deux modèles : un pour les isolateurs en céramique et l'autre modèle pour les isolateurs composites présenté à la figure 12. Son principe d'utilisation, illustré à la figure 13, consiste à balayer l'isolateur avec l'appareil monté à l'extrémité d'une perche isolante. L'appareil détecte automatiquement l'extrémité de la jupe et enregistre la valeur du champ électrique axial correspondante. L'utilisateur doit donc être sur un pylône ou dans une nacelle afin d'être en mesure de balayer tout l'isolateur. Les valeurs de champ électrique mesurées sont ensuite comparées aux valeurs obtenues pour un isolateur identique sain. Tout changement détecté indique la présence d'un défaut. Cela signifie donc que le vérificateur d'isolateurs doit avoir en mémoire les valeurs de champ électrique pour chaque isolateur sain obtenues dans la même configuration de montage afin de fournir l'empreinte qui sert de référence lors de la mesure de l'isolateur supposé défectueux [12, 13].



Figure 12 : vérificateur d'isolateur composite distribué par positron [13].



Figure 13 : Illustration de l'utilisation du vérificateur d'isolateurs sur un isolateur composite [13].

Les différentes investigations réalisées en laboratoire et sur sites ont permis de valider la méthode et déterminer sa sensibilité [6, 12, 16, 38, 39]. La plupart des résultats obtenus sont présentés à la figure 14 où L_d représente la longueur du défaut et L la longueur totale de l'isolateur. Ils montrent que l'utilisation du vérificateur d'isolateurs permet de détecter des défauts externes de longueur minimale égale à environ 5% de la longueur de

l'isolateur lorsque les défauts sont situés au voisinage de l'électrode H.T. de l'isolateur (*live*). La longueur du défaut détectable passe à environ 7,5% pour un défaut situé près de l'électrode de mise à la terre (*ground*) et à environ 12% pour un défaut situé entre les jupes (*floating*). Ces résultats mettent en évidence que les défauts situés au voisinage de la H.T. entraînent une plus grande distorsion dans le champ électrique et sont donc plus facile à détecter que les défauts situées au potentiel flottant.

Bien que la méthode de mesure de champ électrique basée sur l'utilisation du vérificateur d'isolateurs soit la plus sensible, elle demande cependant beaucoup de temps pour inspecter un seul isolateur et n'est donc pas rentable pour analyser l'ensemble d'une ligne aérienne [6]. En outre, à cause de la taille de l'appareil, il n'est pas possible d'inspecter les zones proches de la H.T. en présence d'anneaux de garde. Enfin, très peu d'expérimentations ont été réalisées sur les isolateurs composites présentant des défauts internes. Il est donc difficile de définir la sensibilité du vérificateur d'isolateurs pour les défauts internes, de même qu'en présence de pollution et d'humidité qui semble affecter la distribution du champ électrique et la sensibilité de l'appareil [6, 12].

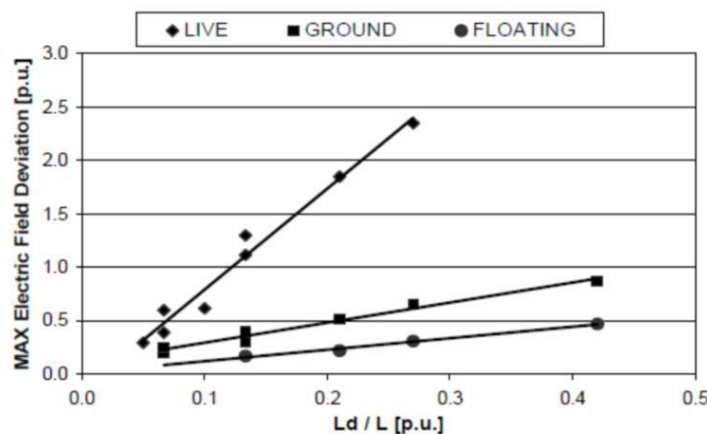


Figure 14 : Déviation maximale du champ électrique en fonction du type et de la longueur du défaut externe présent sur un isolateur composite [9].

2.4.5.2. Capteur électro-optique (EO)

La sensibilité de la méthode de mesure du champ électrique est directement liée, d'une part, à la sensibilité de l'appareil utilisé et d'autre part, à l'endroit où le champ électrique est mesuré. Tel que démontré à l'aide de simulations numériques dans une étude récente [4], la distorsion du champ électrique induite par un défaut conducteur externe est plus importante près de la surface de l'enveloppe qu'à l'extrémité de la jupe d'un isolateur. En d'autres termes, cela signifie que la méthode basée sur la mesure du champ électrique sera beaucoup plus sensible si l'appareil utilisé permet de faire les mesures au plus près du défaut, ce qui n'est pas le cas avec le vérificateur d'isolateurs qui mesure uniquement la composante axiale du champ à l'extrémité des jupes, diminuant ainsi la sensibilité de ce dernier [4].

Les récents progrès en matière de mesure de champ électrique par voie électro-optique (EO) ont permis de développer des capteurs tout fibré ayant une sonde EO compacte permettant de mesurer différentes composantes du champ électrique de manière déportée. Un prototype de capteur EO, présenté à la figure 15, a ainsi été développé par le laboratoire français IMEP-LHAC initialement pour mesurer des champs électriques en haute fréquence. Ce capteur EO permet, avec une grande sensibilité, de mesurer de façon quasi-ponctuelle le champ électrique en tout point d'un isolateur composite. Ces caractéristiques exceptionnelles ont été utilisées par Volat *et al.* pour la détection des défauts externes de petite taille présents sur la surface d'un isolateur composite [4].

Les résultats obtenus ont, dans un premier temps, démontré une excellente conformité entre les résultats des simulations numériques et des mesures expérimentales des différentes composantes du champ électrique. Dans un second temps, les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence que le capteur EO est beaucoup plus sensible que le vérificateur d'isolateurs puisqu'il permet de détecter un défaut externe conducteur

à la H.T. d'environ 3% de la longueur totale de l'isolateur et d'environ 6% pour un défaut au potentiel flottant (entre les jupes).

Cela représente une sensibilité beaucoup plus importante par rapport au vérificateur d'isolateurs (figure 14). En outre, les mesures effectuées ont également démontré que le capteur EO était sensible aux décharges couronnes, ce qui représente un avantage supplémentaire pour la détection des défauts [40].

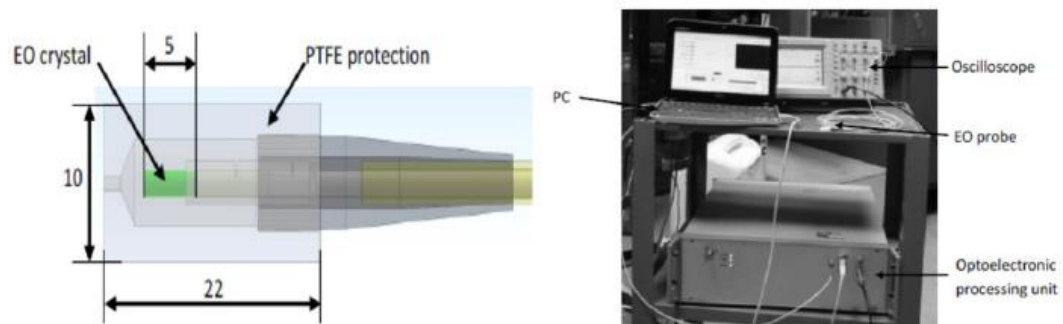


Figure 15 : Prototype du capteur EO utilisé dans la détection des défauts externes conducteurs présents sur un isolateur composite [4].

Cependant, à l'heure actuelle, aucune application du capteur EO pour la détection des défauts internes présents au sein des isolateurs composites n'a encore été réalisée. En outre, il n'existe aucune étude concernant l'influence de la pollution ou de la présence d'anneaux de garde sur la détection des défauts avec le capteur EO. Ces investigations supplémentaires sont nécessaires afin de définir la sensibilité du capteur EO en vue de proposer son éventuelle utilisation sur sites.

2.4.5.2.1. Effet électro-optique

2.4.5.2.1.1. Définition

Le capteur EO utilise la technologie EO apparue dans les années 1980 [41]. L'effet électro-optique est le changement de l'indice de réfraction de certains cristaux sous l'effet d'un champ électrique. La relation entre l'indice de réfraction et le champ électrique appliqué se présente sous deux formes :

- la variation de l'indice de réfraction est proportionnelle au champ électrique, on parle alors d'effet électro-optique linéaire ou **effet Pockels**;
- la variation de l'indice de réfraction est proportionnelle au carré du champ électrique, il s'agit alors d'effet électro-optique quadratique ou **effet Kerr**.

L'effet Pockels est l'effet électro-optique principalement utilisé pour la mesure du champ électrique [42, 43].

2.4.5.2.1.2. Effet Pockels

En présence d'un champ électrique appliqué, certains cristaux optiques, présentent une variation de leurs indices de réfraction proportionnelle au champ électrique appliqué : il s'agit de ***l'effet Pockels***. Les propriétés optiques du cristal sont sondées par une onde lumineuse cohérente (laser) de polarisation prédéfinie. Selon la conception du capteur et la polarisation du faisceau laser de sonde, le champ électrique environnant le cristal EO peut donner lieu à une variation de phase, d'amplitude ou encore d'état de polarisation du faisceau laser ayant traversé le cristal EO [44].

Selon que le cristal EO employé est isotrope (ZnTe, CdTe, BSO,...) ou anisotrope (LiNbO₃, LiTaO₃, KTP, ...), les modifications induites par le cristal sur le faisceau laser de sonde sont respectivement liées soit à deux composantes orthogonales entre elles du champ électrique appliqué, soit à une unique composante de celui-ci et à la température [45].

Plus récemment, un nouveau capteur électro-optique (EO) de champ électrique a été développé par le laboratoire IMEP-LHAC et commercialisé par la société Kapteos [4].

2.4.5.2.1.3. Principe du capteur électro-optique de Kapteos

Le capteur électro-optique de Kapteos est basé sur l'effet Pockels. La modification de l'indice de réfraction est sondée par un faisceau de laser et une unité de traitement optoélectronique permet d'analyser l'état de polarisation de l'onde optique traversant le cristal pour fournir un signal électrique qui est directement proportionnel à la composante du champ électrique sondée. Le cristal EO utilisé étant anisotrope (LiNbO_3), le capteur EO de Kapteos permet de mesurer de manière déportée deux composantes perpendiculaires du champ électrique. En outre, comme le cristal EO est sensible à la température ambiante, Kapteos a développé une technologie brevetée qui permet une compensation en temps réel de l'effet de la température et un découplage de celui-ci du champ électrique [46].

Les principaux avantages du capteur électro-optique de Kapteos est qu'il permet une mesure simultanée, à distance et non invasive, de deux composantes perpendiculaires du champ électrique par l'utilisation d'une sonde EO millimétrique.

2.4.5.2.2. Principaux éléments du capteur EO de Kapteos

Un système de mesure EO est composé de trois principaux éléments :

- une source optique (laser);
- une sonde de mesure fibrée transformant le champ électrique à mesurer en une modulation de faisceau laser;
- une unité de traitement optoélectronique permettant la conversion de cette modulation en un signal électrique analogique, image du champ électrique à mesurer.

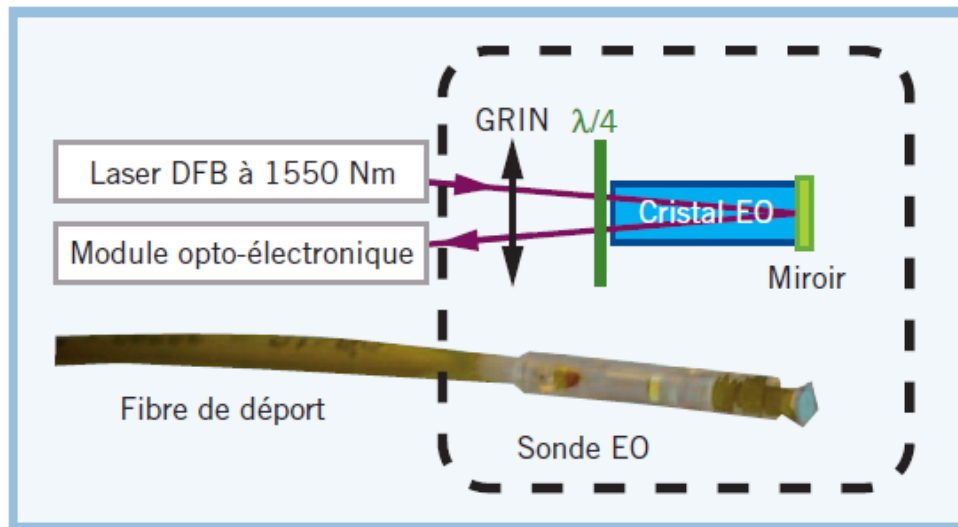


Figure 16 : Principaux éléments de mesure d'un système de mesure EO [47].

2.4.5.2.2.1. La source optique

La source optique est une diode laser DFB très finement accordable en longueur d'onde autour de 1550 nm, de très faible bruit relatif en intensité ($RIN = -160 \text{ dB/Hz}$) et délivrant une puissance optique de quelques dizaines de mW.

2.4.5.2.2.2. La sonde de mesure

La sonde de mesure fibrée se compose d'un cristal EO qui constitue le transducteur de champ électrique. Elle comprend également une lentille à gradient d'indice (GRIN) qui permet de mettre en forme le faisceau optique au sein du capteur et une lame quart d'onde pour conférer un état de polarisation circulaire au faisceau laser à l'entrée du cristal EO. Un miroir est déposé sur la face arrière du cristal afin de réinjecter l'onde optique modulée dans la fibre de départ (figure 16).

2.4.5.2.2.3. Unité de traitement optoélectronique.

Dans le cas d'une modulation d'état de polarisation du faisceau laser de sonde induite par le champ électrique, l'unité de traitement optoélectronique comprend des lames d'onde et des polarisateurs pour convertir la modulation d'état de polarisation en une variation de puissance optique. La modulation de puissance optique est ensuite convertie en signaux électroniques analogiques au moyen de photodiodes. Chaque signal analogique reflète fidèlement l'évolution temporelle d'une des composantes du vecteur champ électrique à mesurer. Les dérives induites par la fibre et l'évolution de température du cristal EO sont compensées en temps réel par différentes boucles de contre-réaction agissant sur la polarisation et la longueur d'onde du laser. Des variations de température du cristal aussi rapides que $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ peuvent ainsi être compensées en temps réel.

Les principaux avantages de l'analyse de la modulation de l'état de polarisation sont les suivants :

- le traitement optique pour extraire les propriétés du champ E peut être facilement réalisé à distance;
- la mesure simultanée de deux composantes transversales du champ électrique.

2.4.6. Études numériques

Les logiciels spécialisés de calcul de champ électrique demeurent des outils essentiels qui sont couramment utilisés dans le dimensionnement et l'étude des isolateurs et des composants qui y sont rattachés [11]. La disponibilité de logiciels commerciaux performants permet de développer des simulations complexes qui se substituent aux tests expérimentaux qui peuvent être longs et fastidieux. Les logiciels de simulation sont tout à fait adaptés pour étudier l'influence des défauts internes ou externes sur la distribution du champ électrique le long des isolateurs composites défectueux. Étant donné qu'il est difficile de recréer expérimentalement la plupart des défauts internes présents sur les

isolateurs composites, la mise en place de simulations numériques s'avère essentielle pour étudier cette problématique.

Il existe un certain nombre de logiciels qui peuvent être utilisés pour effectuer l'analyse du champ électrique le long des isolateurs défectueux. La plupart de ces logiciels disponibles sont basés sur deux méthodes numériques, à savoir, la méthode des éléments finis (MEF) et la méthode des éléments finis de frontières (MEFF) [35, 48, 49].

Avec la méthode des éléments finis de frontière, la formulation utilisée permet d'exprimer toutes les inconnues sur les différentes interfaces du problème. Cela permet ainsi de tenir compte naturellement des problèmes ouverts tout en réduisant la dimension du problème, ce qui diminue le nombre d'éléments utilisés et la taille du problème car seuls les interfaces doivent être discrétisés. Cependant, la MEFF n'est pas adaptée lorsqu'il s'agit de modéliser des surfaces de faibles épaisseurs comme une couche de pollution à la surface d'un isolateur. Dans ce cas particulier, un nombre important d'éléments est requis. En outre, ce nombre augmente avec la diminution de l'épaisseur de la couche.

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus abouties pour résoudre les problèmes complexes présentant de nombreux diélectriques, des matériaux hétérogènes et non linéaires, des domaines complexes, des charges d'espaces distribuées et des points singuliers [50, 51]. Cependant, la MEF nécessite une discrétisation entière du problème, ce qui augmente considérablement le nombre d'éléments par rapport à la MEFF, en particulier lorsqu'il s'agit de problèmes ouverts. Par contre, certains logiciels utilisent des éléments spéciaux infinis qui permettent de tenir compte plus facilement des problèmes ouverts ou encore utilisent des traitements spécifiques qui permettent de simplifier la modélisation des couches conductrices ou diélectriques de faibles épaisseurs en utilisant une approche surfacique. De tels atouts sont regroupés dans le logiciel commercial COMSOL Multiphysics qui a été utilisé avec succès pour résoudre différents

problèmes de calcul de champ électrique en 2D et 3D [52] ainsi que dans l'étude portant sur les défauts conducteurs externes présents sur un isolateur composite [4].

2.5. État d'avancement des travaux de détection des isolateurs défectueux par la mesure du champ électrique

Plusieurs opérateurs des réseaux électriques installent et remplacent régulièrement des isolateurs composites sur les lignes aériennes de transport de l'énergie électrique. Une condition essentielle pour assurer la sécurité de ces opérateurs est de confirmer l'intégrité mécanique et électrique de l'isolateur avant d'effectuer les travaux en ligne. Les travaux de maintenance en ligne ont besoin de méthode simple et économique pour détecter les défauts sur les isolateurs. Ces défauts doivent être classés et analysés en fonction de leur probabilité à causer une défaillance catastrophique pendant les travaux sous-tension.

Vaillancourt et al. [33] ont effectué des essais en laboratoire et en ligne avec le vérificateur d'isolateur pour détecter les isolateurs défectueux. Les résultats ont montré qu'un défaut conducteur de longueur 2,5 cm situé à l'électrode H.T. était détectable. Cependant, la méthode était moins sensible pour les défauts situés au milieu de l'isolateur. En outre, sous des conditions sèche et humide, la méthode a fourni une bonne estimation du pourcentage de la partie de l'isolateur affecté par le défaut et les contaminants, permettant ainsi d'évaluer le niveau de sécurité pour les travaux en ligne.

Chen, Li, Liang et Wang [53] ont utilisé la méthode de cartographie du champ électrique pour détecter les défauts internes au sein d'un isolateur composite de 110 kV. Les tests ont été réalisés dans les conditions sèche et propre, humide, et polluée. Les résultats ont montré que dans les conditions sèches et propres, les défauts de cheminement s'étendant sur une ou deux jupes peuvent être facilement détectés à proximité de l'électrode H.T. D'autres expériences ont indiqué que la distribution du champ électrique était fortement déformée pour des isolateurs pollués et humides. L'auteur a conclu qu'à 82% d'humidité

ou moins, la méthode de cartographie du champ électrique est efficace pour les inspections.

Dans un autre article, Ravi Gorur et al [11] ont étudié la possibilité de détecter les défauts internes au sein des isolateurs composites par la mesure du champ électrique. Le logiciel commercial Coulomb a été utilisé en 3D. Il a été observé que, plus le défaut est conducteur, mieux il est détectable. En outre, la sensibilité de la méthode basée sur la mesure du champ électrique augmente considérablement lorsque la composante radiale du champ électrique est mesurée en lieu et place de sa composante axiale qui est mesurée conventionnellement [11].

Gela et Mitchell [39] ont conduit un projet de recherche visant à analyser la performance des isolateurs composites avant les travaux en ligne. Les calculs du champ électrique ont été réalisés le long d'une ligne de référence à environ 40 mm de l'extrémité des jupes à la fois pour un isolateur défectueux et sans défaut. Les résultats ont montré que le comportement numérique théorique prédit de la distribution du champ électrique le long de l'isolateur présentant un défaut a été confirmé expérimentalement. En outre, la présence d'une couche de pollution humide sur l'isolateur déforme la distribution du champ électrique.

C. Volat et al. [4] ont présenté une amélioration de la méthode de diagnostic des isolateurs composites basée sur la mesure du champ électrique avec l'utilisation d'un capteur EO pour la détection de défauts externes de petite taille sur la surface des isolateurs composites. Les résultats ont montré une conformité entre les résultats expérimentaux et numériques. En outre, il a été démontré que le capteur EO a été capable de détecter un défaut conducteur de longueur 1,5 cm (3% de la longueur totale de l'isolateur) situé près de l'électrode H.T. et un défaut conducteur de longueur 2,6 cm (7% de la longueur totale de l'isolateur) situé entre les deux premières jupes.

2.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter les notions utiles à la bonne conduite de ce projet de recherche. Nous avons pu noter que nonobstant les avantages des isolateurs composites, ces derniers présentent des inconvénients. En outre, l'application de la tension de service combinée aux diverses contraintes et leurs interactions mutuelles provoquent la dégradation des isolateurs composites qui doit être détectée le plus tôt possible pour éviter la défaillance de ces derniers.

L'existence de plusieurs outils de diagnostic permet de détecter la plupart des dégradations des isolateurs composites. Cependant, l'état d'avancement des travaux de recherche en rapport avec notre problématique, indiquent que très peu d'études ont été consacrées aux défauts internes au sein des isolateurs composites. Ceci justifie l'intérêt de ce travail de recherche.

Chapitre 3 :

ETUDE NUMERIQUE D'UN ISOLATEUR COMPOSITE 28 kV

3.1. Introduction

Tel que présenté dans la revue de la littérature, l'utilisation d'outils numériques est une excellente alternative aux mesures expérimentales. Les simulations numériques représentent la partie principale du présent projet de recherche. Ce chapitre, est consacré à l'étude de l'influence de la taille et de la position d'un défaut interne présent au sein d'un isolateur composite sur les composantes axiale et radiale du champ électrique. De plus, l'intérêt d'utiliser l'orientation du champ électrique à la surface de l'enveloppe d'un isolateur composite comme outil pour la détection d'un défaut interne est également examiné.

Les résultats préliminaires relatifs à l'influence des caractéristiques d'un défaut interne (position, taille) sur les composantes axiale et radiale du champ électrique le long d'un isolateur composite sont présentés. Un intérêt particulier a été porté sur la comparaison des distributions des composantes du champ électrique obtenues à l'extrémité des jupes et près de la surface de l'enveloppe de l'isolateur. Cela correspond respectivement à la position du vérificateur d'isolateurs et du capteur électro-optique (EO).

3.1.1. Isolateur utilisé pour les études numériques

L'étude a été réalisée avec le modèle numérique 3D d'un isolateur composite 28 kV dont l'enveloppe est en matériau thermoplastique élastomère (TPE). Les caractéristiques principales et le modèle numérique 3D de l'isolateur sont respectivement présentés dans le tableau 1 et sur la figure 17. Les modèles numériques et les modélisations associées ont été réalisés avec le logiciel commercial d'éléments finis COMSOL Multiphysics 4.3a.

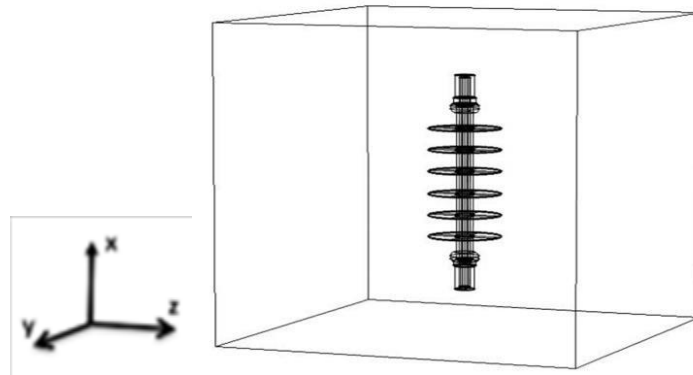


Figure 17 : Modèle 3D de l'isolateur composite TPE 28 kV.

Tableau 1 : Caractéristiques de l'isolateur composite TPE 28kV.

Longueur totale (mm)	438
Distance d'arc (mm)	285
Distance de fuite (mm)	675
Nombre de jupes	6
Diamètre des jupes (mm)	100
Diamètre de la tige (mm)	14

3.1.2. Positions des différents défauts internes

Tous les défauts internes ont été modélisés sous la forme d'un cylindre de 1,5 mm de rayon ayant des longueurs différentes : 15 mm et 30 mm correspondant respectivement à 3,5% et 7% de la longueur totale de l'isolateur. Les défauts internes ont été positionnés à proximité de l'électrode haute tension (HT) (figures 18-a et 18-b) conformément à la majorité des cas rapportés [16, 17] et au milieu de l'isolateur entre deux jupes (figure 18-c). Pour chacune des positions, le défaut interne est situé entre la tige et

l'enveloppe de l'isolateur afin de simuler l'initiation de la fracture interne, comme observé dans les cas pratiques [5, 16, 17].

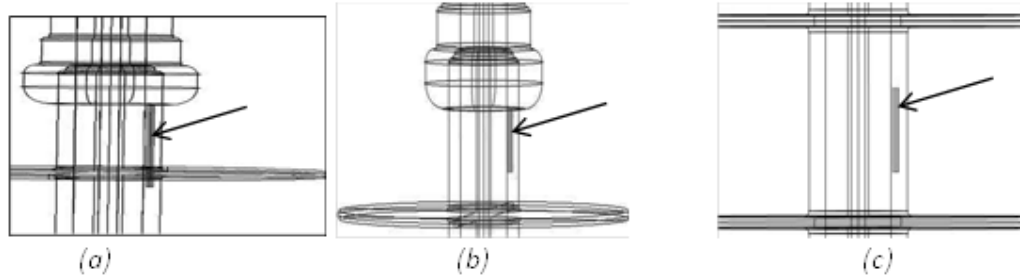


Figure 18 : Modèle 3D des défauts internes, défaut de 30 mm à l'électrode HT (a), défaut de 15 mm à l'électrode HT (b) et défaut de 15 mm au milieu entre deux jupes (c).

3.1.3. Propriétés des matériaux

Chaque région du modèle numérique a été spécifiée avec les propriétés appropriées des matériaux. Des conductivités faibles mais différents de zéro (0) ont été attribuées au noyau et à l'enveloppe de l'isolateur, de même que l'air entourant l'isolateur, comme présenté dans le tableau 2, afin de permettre à la solution de converger sans rencontrer de problème de division par zéro (0) [54]. Les propriétés du défaut ont été choisies conformément à la littérature.

Tableau 2 : Propriétés des matériaux.

Matériaux	Permittivité relative ϵ_r	Conductivité électrique σ (S/m)
Électrodes	1	$5,9.10^7$
Enveloppe en Silicone	4,3	$1,0.10^{-14}$
Tige en fibres de verre	7,2	$1,0.10^{-14}$
Air environnement	1	$1,0.10^{-15}$
Défaut semi-conducteur	80	0,003

3.1.4. Conditions aux limites

Pour toutes les simulations, la tension appliquée aux bornes de l'isolateur composite correspond à la tension de service entre phase et terre. L'une des électrodes est soumise à la valeur efficace de la tension simple du réseau tandis que l'autre électrode et les bords extérieurs de la région d'air entourant l'isolateur sont affectés au potentiel zéro (0).

3.1.5. Maillage

Après avoir terminé l'étape initiale de la construction du modèle, ainsi que la spécification des propriétés des matériaux et des conditions aux limites, le domaine entier est discrétisé en éléments finis de type tétraèdre pendant le processus de maillage. Afin d'améliorer la précision des résultats des simulations, un raffinement du maillage (figure 19) est réalisé dans la région de grand intérêt pour augmenter le nombre d'éléments et ainsi améliorer la précision de la solution. Le choix du nombre d'éléments est important et doit être équilibré. En effet, un nombre faible d'éléments peut réduire la précision des résultats de simulation, tandis qu'un grand nombre d'éléments augmente la taille du problème et entraîne un temps de traitement long. Ainsi, il est important de trouver un nombre optimisé d'éléments qui facilitera un temps de calcul plus rapide sans compromettre la précision du résultat.

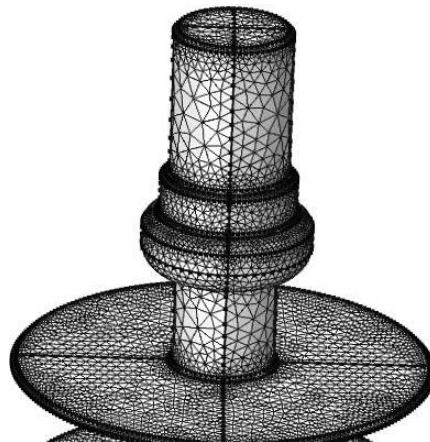


Figure 19 : Vue du maillage de l'isolateur composite 28 kV.

3.1.6. Calcul des composantes axiale et radiale du champ électrique

Les composantes axiale et radiale du champ électrique ont été calculées le long de l'isolateur suivant une ligne de référence linéaire située respectivement à 3 mm de la surface de l'enveloppe (figure 20-a) et de l'extrémité des jupes (20-b). Cela correspond respectivement à la position du capteur EO et du vérificateur d'isolateurs.

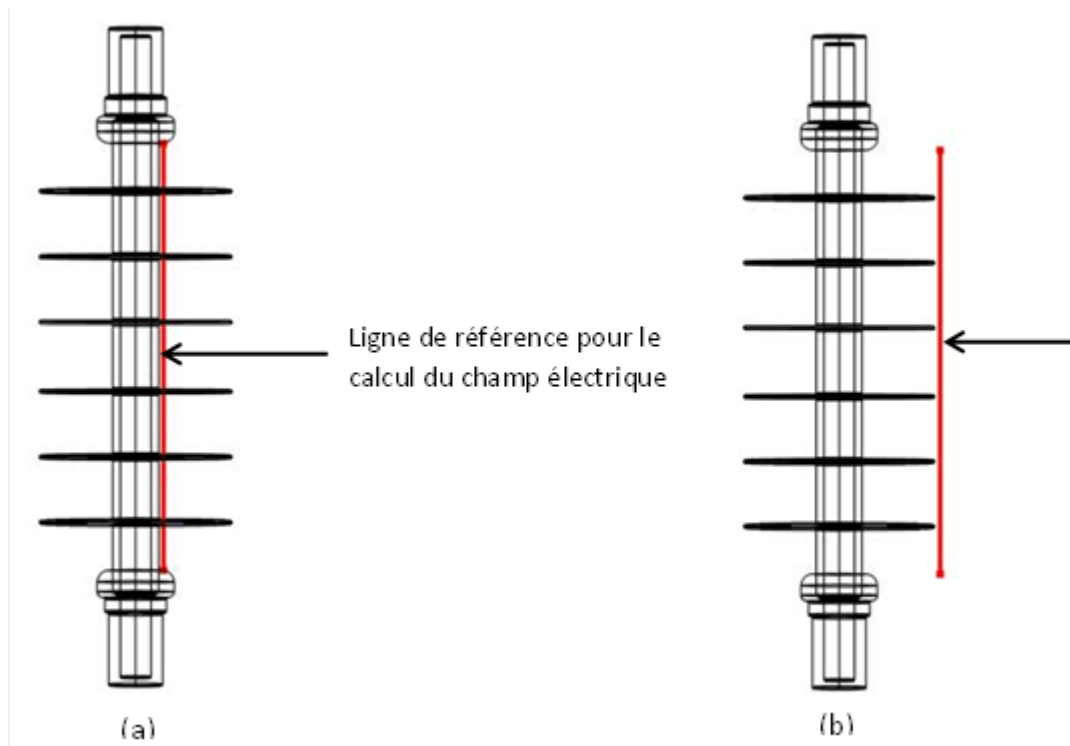


Figure 20 : Position de la ligne de référence pour le calcul des composantes du champ électrique à 3 mm de l'enveloppe (a) et l'extrémité des jupes (b) de l'isolateur

3.1.7. Méthodologie générale de détection d'un défaut interne

En présence de chaque défaut interne, les composantes axiale et radiale du champ électrique de l'isolateur sans défaut et défectueux ont été calculées suivant les lignes de référence décrites à la figure 20. Ensuite, les distributions du champ électrique obtenues de l'isolateur sans défaut et avec défaut ont été comparées pour rechercher les déformations qui indiquent la présence d'un défaut interne. De plus, à partir des résultats obtenus, le rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ a été déterminé en présence de chaque défaut interne en fonction de sa position. $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ est la rapport des valeurs du champ lorsque l'écart entre la distribution du champ avec défaut (E_d) et celle sans défaut ($E_{s/d}$) est maximal.

3.2. Résultats et analyses des simulations pour les défauts internes à l'électrode H.T. et entre deux jupes (potentiel flottant)

3.2.1. Comparaison des distributions de la composante axiale du champ électrique près de l'enveloppe et à l'extrémité des jupes.

Cette section présente la distribution de la composante axiale du champ électrique calculée le long d'une ligne de référence située à 3 mm de l'extrémité des jupes de l'isolateur (figure 20-b) et le long d'une ligne de référence située à 3 mm de la surface de l'enveloppe de l'isolateur (figure 20-a). Les résultats sont présentés respectivement sur les figures 21 et 22. De plus, à partir des résultats obtenus, les valeurs des rapports de la composante axiale du champ électrique obtenue avec défaut (E_d) sur sa composante axiale obtenue sans défaut ($E_{s/d}$) ont été déterminées et résumées dans le tableau 3.

Les résultats obtenus montrent que la distorsion de la composante axiale du champ électrique augmente avec la taille du défaut, conformément aux observations de G.H. Vaillancourt et al.[16, 33]. De plus, il peut être observé que la présence d'un défaut interne entre deux jupes (au potentiel flottant) qui n'est pas visible à partir de l'extrémité des jupes (figure 21), induit une distorsion observable dans la distribution du champ électrique près de la surface de l'enveloppe de l'isolateur (figure 22). Pour les deux

défauts internes situés à l'électrode H.T. la déformation de la composante axiale du champ électrique est plus importante près de la surface de l'enveloppe qu'à l'extrémité des jupes de l'isolateur. A partir de la comparaison des résultats présentés dans le tableau 3, il est possible de remarquer que pour le même défaut interne la composante axiale du champ électrique calculée près de la surface de l'enveloppe subit une déformation plus importante que celle calculée à l'extrémité des jupes pour la même position du défaut. De plus, les distorsions induites en présence d'un défaut interne semblent indépendantes de la position de ce dernier pour une même longueur de défaut.

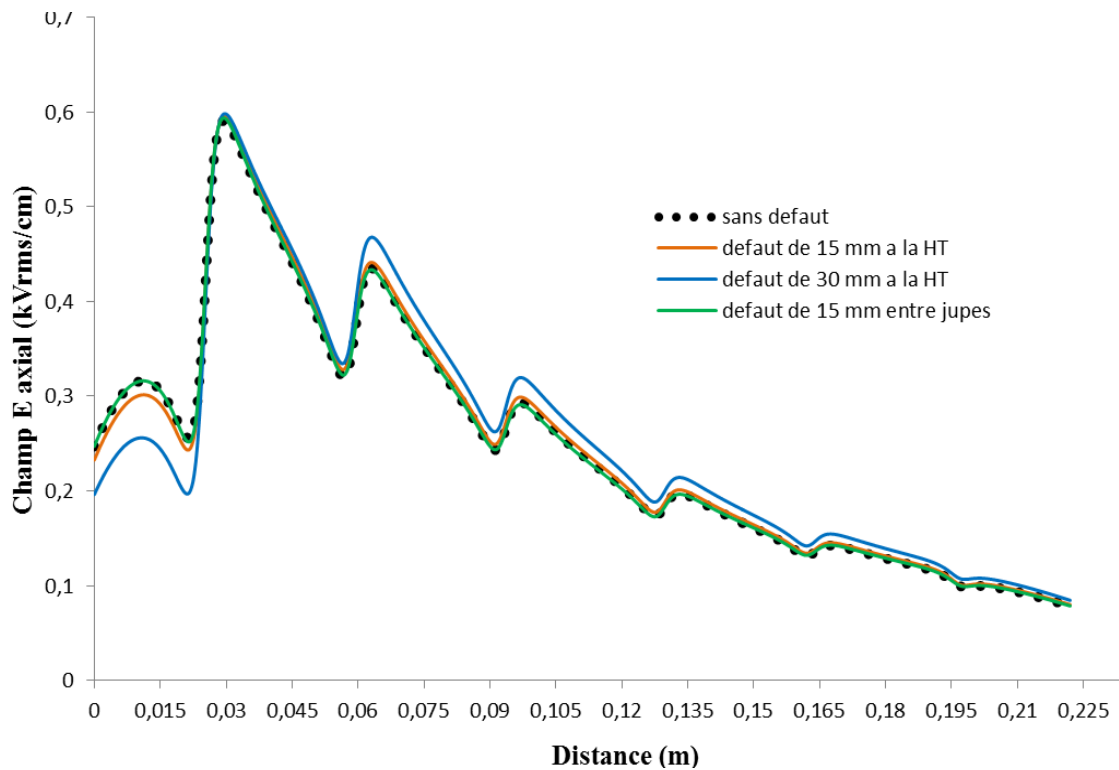


Figure 21 : Distribution de la composante axiale du champ électrique à 3 mm de l'extrémité des jupes.

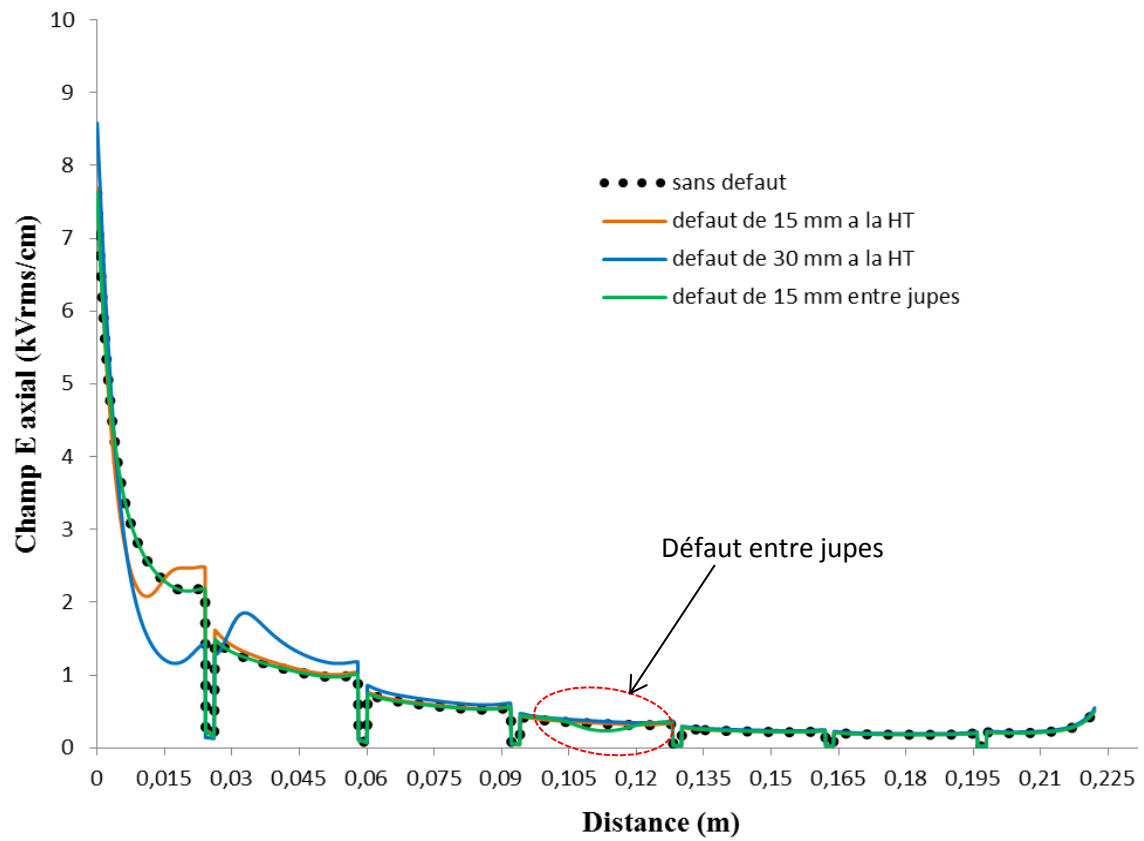


Figure 22 : Distribution de la composante axiale du champ électrique à 3 mm de la surface l’enveloppe.

Tableau 3 : Valeurs des rapports des composantes axiales du champ électrique $E_d/E_{s/d}$.

$\frac{L_{\text{defaut}}}{L_{\text{total isolateur}}} (\%)$	Position du défaut	Position de la ligne de référence (calcul)	
		Extrémité des jupes	Surface de l’enveloppe
3,5	Haute Tension	0,95	0,78
7	Haute Tension	0,81	0,54
3,5	Entre jupes	1	0,76

3.2.2. Comparaison des distributions de la composante radiale du champ électrique près de l'enveloppe et à l'extrémité des jupes.

La composante radiale du champ électrique a été calculée le long des lignes de référence présentées à la figure 20. Les figures 23 et 24 présentent respectivement la distribution de la composante radiale du champ électrique obtenue à l'extrémité des jupes (figure 20-b) et près de la surface de l'enveloppe de l'isolateur figure (20-a). Le tableau 4 résume les valeurs des rapports E_d et $E_{s/d}$ entre la composante radiale du champ électrique avec défaut et sans défaut.

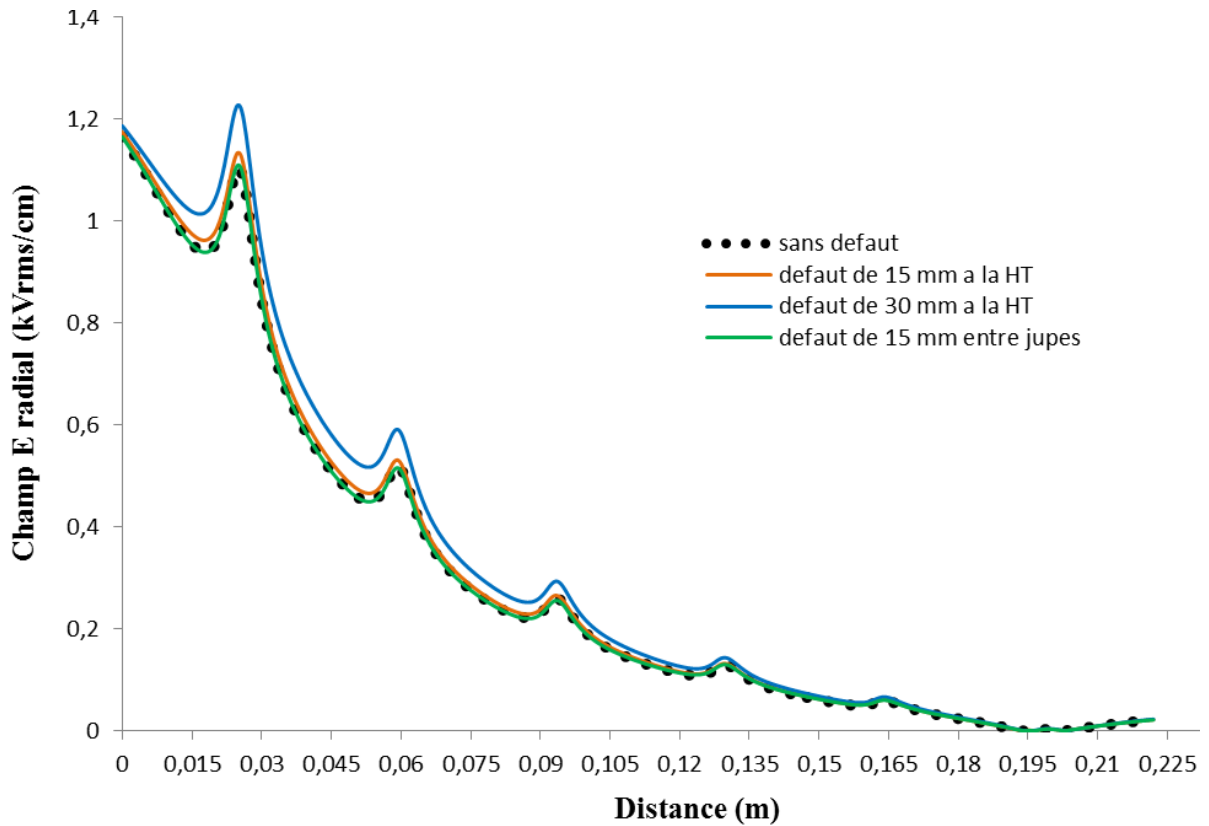


Figure 23 : Distribution des composantes radiales du champ électrique à 3 mm de l'extrémité des jupes.

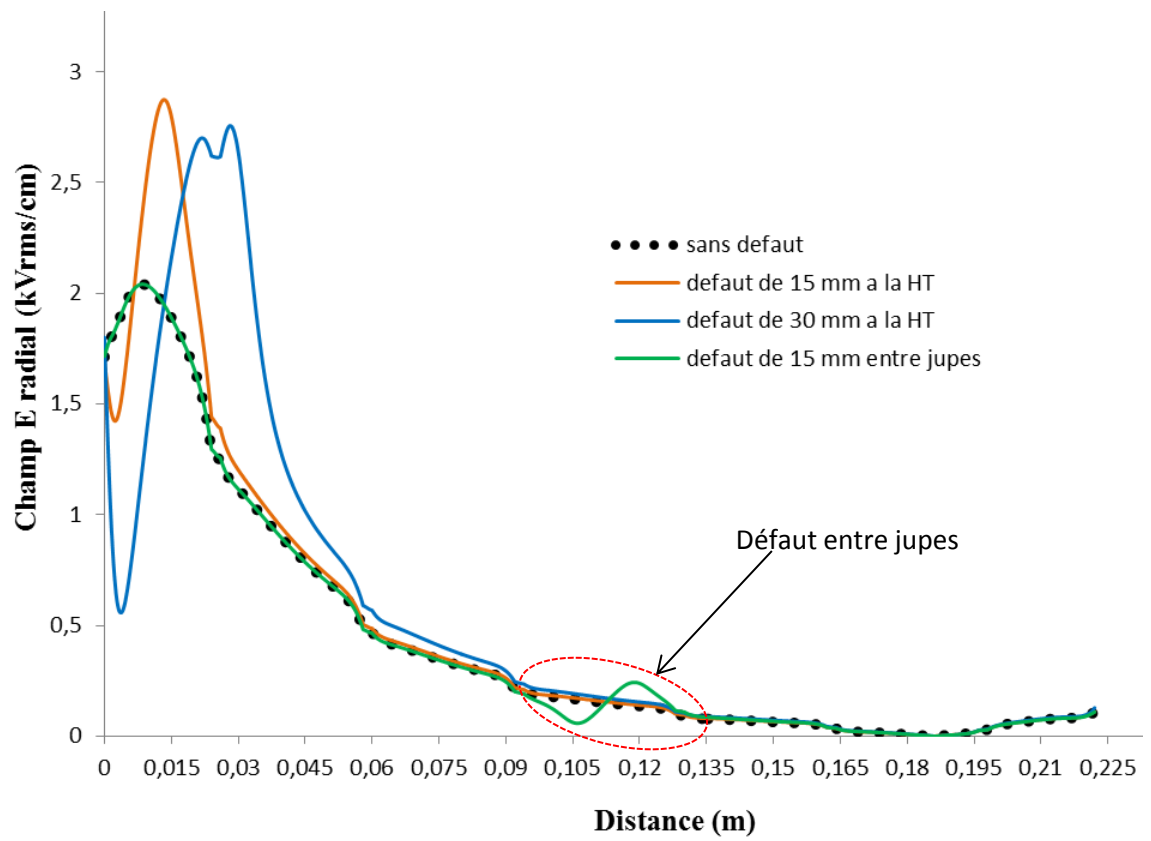


Figure 24 : Distribution des composantes radiales du champ électrique à 3 mm de la surface de l'enveloppe.

Comme observé pour la composante axiale du champ électrique, les déformations induites dans la composante radiale du champ électrique par la présence d'un défaut interne sont plus importantes près de la surface de l'enveloppe qu'à l'extrémité des jupes de l'isolateur. De plus, le défaut interne entre deux jupes (au potentiel flottant) qui n'est pas visible lorsque le champ électrique est calculé à l'extrémité des jupes est détectable pour les valeurs du champ électrique près de la surface de l'enveloppe de l'isolateur. A partir de la comparaison des résultats présentés dans le tableau 4, il est possible de remarquer que pour le même défaut interne la composante radiale du champ électrique calculée près de la surface de l'enveloppe subit une déformation plus importante que celle calculée à l'extrémité des jupes pour la même position du défaut.

De plus, les distorsions induites en présence d'un défaut interne semblent indépendantes de la position de ce dernier pour une même longueur de défaut.

Tableau 4 : Valeurs du rapport des composantes radiales du champ électrique $E_d/E_{s/d}$.

$\frac{L_{defaut}}{L_{total\ isolateur}}$ (%)	Position du défaut	Position de la ligne de référence (calcul)	
		Extrémité des jupes	Surface de l'enveloppe
3,5	Haute Tension	1,03	1,42
7	Haute Tension	1,11	2,39
3,5	Entre jupes	1	1,45

3.3. Exploitation des composantes axiale et radiale du champ électrique calculées simultanément près de la surface de l'enveloppe d'un isolateur.

3.3.1. Détermination de l'orientation du champ électrique à la surface de l'enveloppe de l'isolateur

Cette partie analyse l'orientation du champ électrique (figure 25) le long d'une ligne située à 3 mm de la surface de l'enveloppe de l'isolateur. Elle a été déterminée à partir des composantes axiale (E_{axial}) et radiale (E_{radial}) du champ électrique calculées dans les simulations précédentes.

L'orientation du champ électrique est donnée par la formule suivante :

$$\theta(degré) = \tan^{-1} \left(\frac{E_{axial}}{E_{radial}} \right) \quad (1)$$

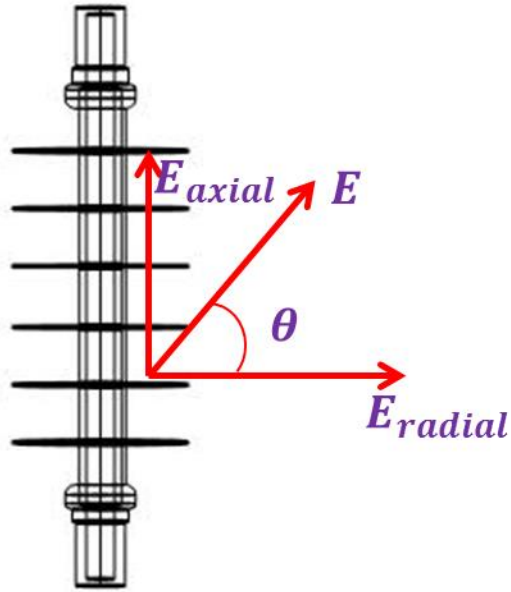


Figure 25 : Illustration de l'orientation θ du champ électrique près de la surface de l'enveloppe.

La figure 26 présente la comparaison de l'orientation θ du champ E obtenue le long d'une ligne située à 3 mm de la surface de l'enveloppe d'un isolateur composite sans défaut et avec un défaut interne semi-conducteur ayant une longueur de 15 mm (représentant 3,5% de la longueur totale de l'isolateur). Le défaut est situé respectivement près l'électrode haute tension (HT) et entre deux jupes au milieu de l'isolateur. Le tableau 5 présente les valeurs du rapport de l'orientation du champ électrique de l'isolateur sans défaut ($\theta_{s/d}$) et avec défaut (θ_d). $\theta_{s/d}$ et θ_d ont été déterminés respectivement de la même manière que $E_{s/d}$ et E_d .

Les résultats obtenus montrent que la présence d'un défaut interne semi-conducteur induit une déformation dans la courbe de l'orientation θ du champ électrique. Cette déformation est localisée dans la zone où se situe le défaut interne. En outre, les résultats du tableau 5 montrent que les valeurs du rapport $\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$ obtenues pour chaque position du

défaut interne sont dans l'intervalle des valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ de la composante axiale du champ électrique pour les mêmes défauts internes (tableau 3).

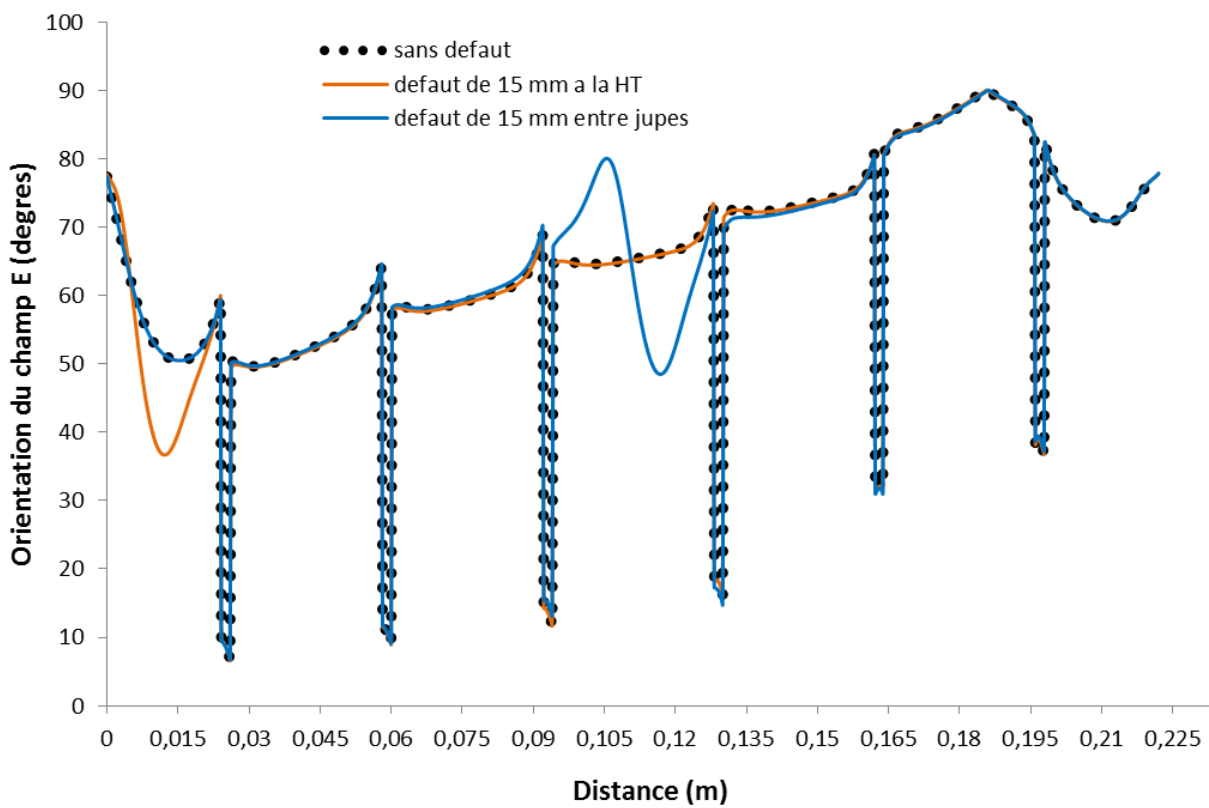


Figure 26 : Orientation du champ électrique le long d'une ligne située à 3 mm de la surface de l'enveloppe de l'isolateur.

Tableau 5 : Valeurs du rapport $\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$ de l'orientation du champ électrique

$\frac{L_{defaut}}{L_{total\ isolateur}}$ (%)	Position du défaut	$\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$
3,5	Haute Tension (HT)	0,70
3,5	Entre deux jupes	0,72

3.3.2. Analyse des résultats obtenus

La mesure simultanée des composantes axiale et radiale du champ électrique permet de déterminer l'orientation θ du champ électrique suivant une ligne située le long d'un isolateur composite. L'orientation θ du champ électrique s'avère être un outil supplémentaire et efficace pour la détection d'un défaut interne.

En somme, la mesure simultanée des composantes axiale et radiale du champ électrique près de la surface de l'enveloppe d'un isolateur composite présente des avantages par rapport à la mesure exclusive de la composante axiale du champ électrique à l'extrémité des jupes.

3.4. Conclusion

Dans cette partie, des modélisations numériques 3D ont été réalisées avec un isolateur composite 28 kV présentant des défauts internes situés entre le noyau et l'enveloppe respectivement à l'électrode H.T. et entre deux jupes au milieu de l'isolateur. Les défauts internes ont été modélisés sous la forme d'un cylindre semi-conducteur de rayon 1,5 mm avec différentes longueurs correspondant respectivement à 3,5% et 7% de la longueur totale de l'isolateur. Les distributions des composantes axiale et radiale du champ électrique ont été étudiées pour les différents défauts internes. Les résultats des simulations ont permis de mettre en évidence plusieurs avantages liés à la mesure simultanée des composantes axiale et radiale du champ électrique près de la surface de l'enveloppe d'un isolateur composite.

Premièrement, les distorsions du champ électrique induites par les défauts internes sont significativement plus importantes (allant jusqu'au double) près de l'enveloppe qu'aux extrémités des jupes de l'isolateur. Cela démontre qu'une meilleure sensibilité de la détection d'un défaut interne par la mesure du champ électrique est obtenue lorsque les mesures s'effectuent au plus près du défaut interne (près de la surface de l'enveloppe).

Deuxièmement, les différents résultats obtenus montrent que les distorsions induites par un défaut interne au potentiel flottant (entre les jupes et les plus difficiles à détecter) sont largement identifiables (en particulier avec la composante radiale) dans les distributions des composantes du champ électrique calculées près de la surface de l'enveloppe. Ce qui n'est pas le cas pour celles déterminées à l'extrémité des jupes.

Troisièmement, la composante radiale du champ électrique semble la plus sensible au défaut que la composante axiale. Ceci montre l'importance de mesurer deux composantes du champ électrique pour la détection d'un défaut.

Quatrièmement, la mesure simultanée des composantes axiale et radiale du champ électrique permet de déterminer l'orientation du champ électrique le long d'une ligne près de la surface de l'enveloppe. Cette information supplémentaire peut être exploitée pour la détection des défauts internes.

En résumé, ces premiers résultats issus de simulations numériques tridimensionnelles mettent clairement en évidence l'intérêt de mesurer simultanément les composantes axiale et radiale du champ électrique près de la surface de l'enveloppe d'un isolateur composite, soit au plus près du défaut interne.

Chapitre 4 :

ETUDE NUMERIQUE D'ISOLATEURS COMPOSITES 69 kV, 115 kV et 230 kV

4.1. Introduction

Cette partie est consacrée à une série d'études numériques afin de déterminer l'influence de la taille et de la position des défauts internes sur les composantes axiale et radiale du champ électrique, l'influence de la pollution, de la présence d'anneau de garde, de la profondeur du défaut interne et de la position de la ligne de référence sur le diagnostic des isolateurs composites. De plus, il est également proposé d'étudier la possibilité de déterminer la longueur exacte de la partie défectueuse d'un isolateur composite.

Pour cette deuxième phase de notre étude, des isolateurs composites employés dans le domaine du transport de l'énergie électrique ont été utilisés car sujets à plus de défauts internes que les isolateurs composites de distribution.

4.1.1. Isolateurs utilisés pour les études numériques

Toutes les études réalisées dans cette partie ont utilisé les modèles numériques de trois (3) différents types d'isolateurs composites de la société Sediver qui sont les plus utilisés dans le monde entier [55]. Ils présentent la même forme (figure 27) et seul le nombre de jupes diffère en fonction de la tension de service. Le tableau 6 présente les caractéristiques des isolateurs 69 kV, 115 kV et 230 kV.

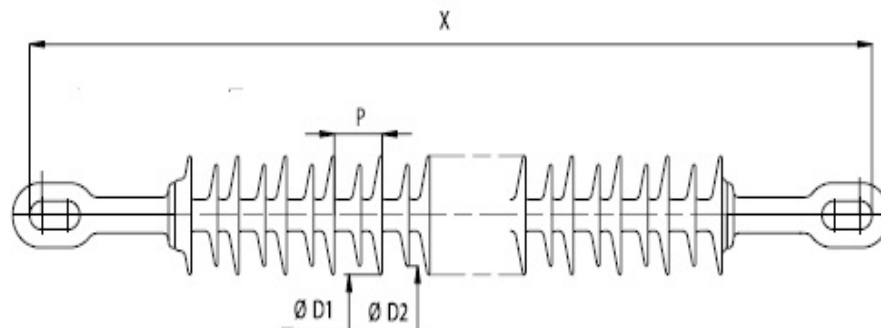


Figure 27 : Modèle d'un isolateur composite Sediver [55].

Tableau 6 : Caractéristiques des isolateurs composites utilisés [55].

	Isolateur 69 kV	Isolateur 115 kV	Isolateur 230 kV
Longueur X (mm)	866	1086	1974
Diamètre petite jupe D2 (mm)	72	72	72
Diamètre grande jupe D1 (mm)	92	92	92
Nombre de jupes	21	29	61
Diamètre tige (mm)	16	16	16
Diamètre enveloppe (mm)	32	32	32
Distance d'arc (mm)	601	821	1630
Distance de fuite	1810	2510	5310

4.1.2. Positions des différents défauts internes

Tous les défauts internes ont été modélisés sous la forme d'un cylindre ayant différentes longueurs. Ils ont été positionnés respectivement à proximité de l'électrode H.T. (figure 28-a), au milieu de l'isolateur (figure 28-b) et au voisinage de l'électrode de mise à la terre (figure 28-c) conformément à la majorité des cas rapportés dans la littérature [5, 16, 17].

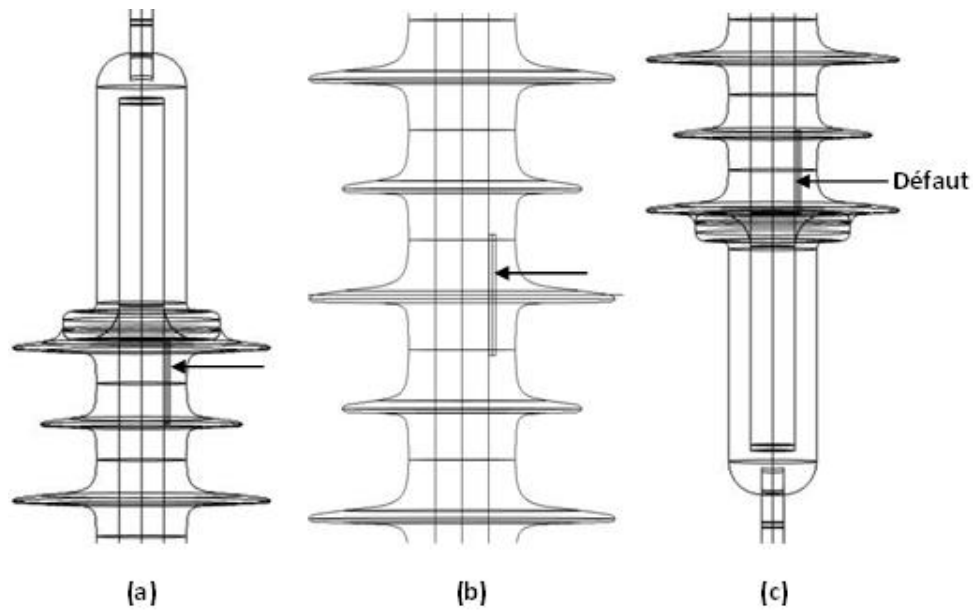


Figure 28 : Modèle 3D d'un défaut interne dans les positions : (a) position 1 (HT), (b) position 2 (potentiel flottant) et (c) position 3 (Terre)

4.1.3. Propriétés des matériaux

Chaque région du modèle numérique a été spécifiée avec les propriétés appropriées des matériaux. Des conductivités faibles mais différents de zéro (0) ont été attribuées au noyau et à l'enveloppe de l'isolateur, de même que l'air entourant, l'isolateur comme présenté dans le tableau 7, afin de permettre à la solution de converger sans rencontrer de problème de division par zéro (0) [54].

Tableau 7 : Propriétés des matériaux.

Matériaux	Permittivité relative ϵ_r	Conductivité électrique σ (S/m)
Électrodes	1	$5,9.10^7$
Enveloppe en Silicone	4,3	$1,0.10^{-14}$
Tige en fibres de verre	7,2	$1,0.10^{-14}$
Air environnant	1	$1,0.10^{-15}$
Défaut semi-conducteur	80	0,003

4.1.4. Conditions aux limites

Pour toutes les simulations, la tension appliquée aux bornes de l'isolateur composite correspond à la tension de service entre phase et terre. L'une des électrodes est soumise à la valeur efficace de la tension simple du réseau tandis que l'autre électrode et les bords extérieurs de la région d'air entourant l'isolateur sont affectés au potentiel zéro (0). De plus, des éléments infinis ont été utilisés dans cette partie afin de tenir compte des problèmes ouverts (figure 29-a), ce qui permet de diminuer la taille du problème.

4.1.5. Maillage

Après avoir terminé l'étape initiale de la construction du modèle ainsi que la spécification des propriétés des matériaux et des conditions aux limites, le domaine entier est discrétisé en éléments tétraèdres pendant le processus de maillage. Afin d'améliorer la précision des résultats de simulation, un raffinement du maillage (figure 29-b) est réalisé dans la région de grand intérêt pour augmenter le nombre d'élément et ainsi améliorer la précision de la solution.

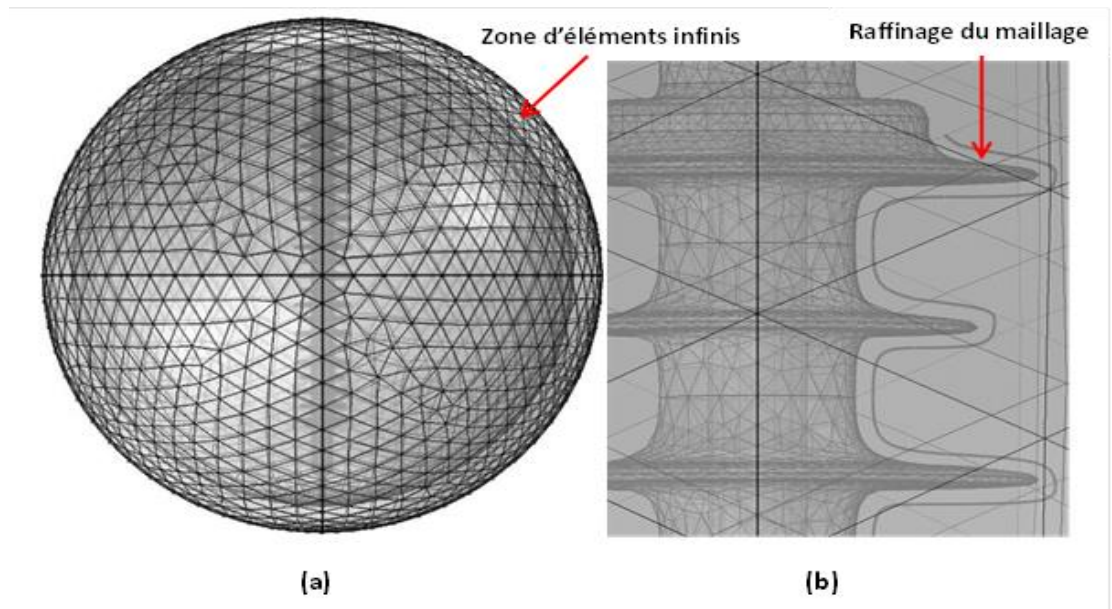


Figure 29 : Vue du maillage du modèle 3D (a) et du raffinement (b).

4.1.6. Calcul des composantes axiale et radiale du champ électrique

Contrairement aux distributions des composantes du champ électrique présentées dans la section précédente, il a été décidé d'opter pour le calcul ponctuel de ces dernières. En effet, le calcul ponctuel a été choisi car il se rapproche de l'utilisation du capteur EO. De plus, il permet de simplifier la méthode par une réduction du nombre de points de mesure.

Les points de calcul ont été sélectionnés le long de l'isolateur au milieu de deux jupes consécutives suivant une ligne de référence située à 3 mm de la surface de l'enveloppe, comme indiqué à la figure 30. Les points de calcul sont illustrés sous la forme de petits cercles noirs.

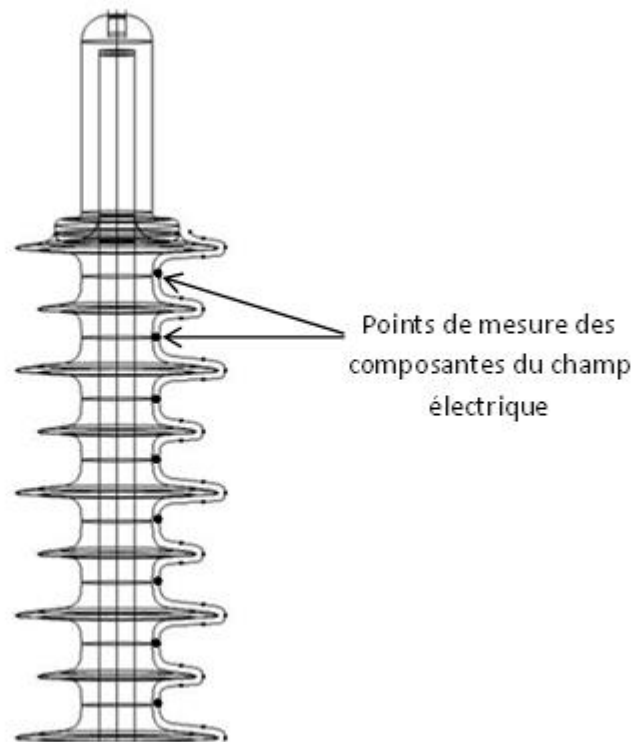


Figure 30 : Illustration des points pour le calcul des composantes axiale et radiale du champ électrique.

4.2. Simplification du modèle numérique de l'isolateur composite

4.2.1. Introduction

Les isolateurs composites disponibles sur le marché présentent des caractéristiques différentes selon les fabricants. En outre, leurs longueurs diffèrent en fonction de la tension électrique de service. A titre d'exemple, un isolateur composite SEDIVER de 69 kV a une longueur de 866 mm avec 21 ailettes, tandis qu'un isolateur composite 230 kV de la même compagnie a une longueur de 1974 mm avec 61 ailettes [55].

Dans le domaine de la simulation numérique, un isolateur plus long entraîne un nombre élevé d'éléments du maillage. Cela, augmente la taille du problème et la durée de calcul de la solution numérique. Ainsi, pour réduire le temps de calcul, sans affecter la précision

de la solution, des simplifications du modèle numérique s'imposent. Une telle simplification a été proposée à travers la réduction du nombre de jupes de l'isolateur dans une étude antérieure [56]. Dans la présente étude, des jupes ont été conservées seulement dans les régions où les défauts internes sont susceptibles d'apparaître conformément à la majorité des cas rapportées [5, 16, 17]. Par conséquent, quatre (4) différents modèles de simplifications ont été considérés et comparés comme présenté à la figure 31:

- (a) Cinq 5 jupes près des électrodes haute tension et de mise à la terre
- (b) Cinq 5 jupes près de l'électrode haute tension
- (c) Cinq 5 jupes près de l'électrode de mise à la terre
- (d) Cinq 5 jupes au potentiel flottant
- (e) Isolateur complet

L'étude a été réalisée avec un isolateur composite 69 kV dont le modèle et les caractéristiques sont respectivement présentés à la figure 27 et au tableau 6. Les composantes axiale et radiale du champ électrique de l'isolateur simplifié et complet ont été calculées suivants les points illustrés sur la figure 30 puis comparées afin de mesurer l'impact des simplifications proposées.

4.2.2. Analyse des résultats

Le tableau 8 présente les valeurs moyennes des composantes du champ électrique de l'isolateur complet et des différents modèles d'isolateurs simplifiés de même que l'erreur relative. Les valeurs moyennes ont été calculées selon la formule suivante :

$$Emoy = \sum_{i=1}^N \frac{E_i}{N} \quad (2)$$

E_i représente la valeur de la composante du champ électrique au point i et N le nombre total de points de calcul des composantes du champ électrique dans la zone considérée.

Les résultats indiquent que la réduction du nombre de jupes de l'isolateur a peu d'influence sur la distribution du champ électrique dans les zones disposant de jupes. En effet, dans ces zones, l'erreur relative maximale est de 2,53% pour la composante axiale et de 3,9% pour la composante radiale. Cependant, dans les zones dépourvues de jupes, la distribution du champ électrique est largement affectée car la valeur maximale de l'erreur relative est de 11,56% pour la composante axiale et de 83,18% pour la composante radiale.

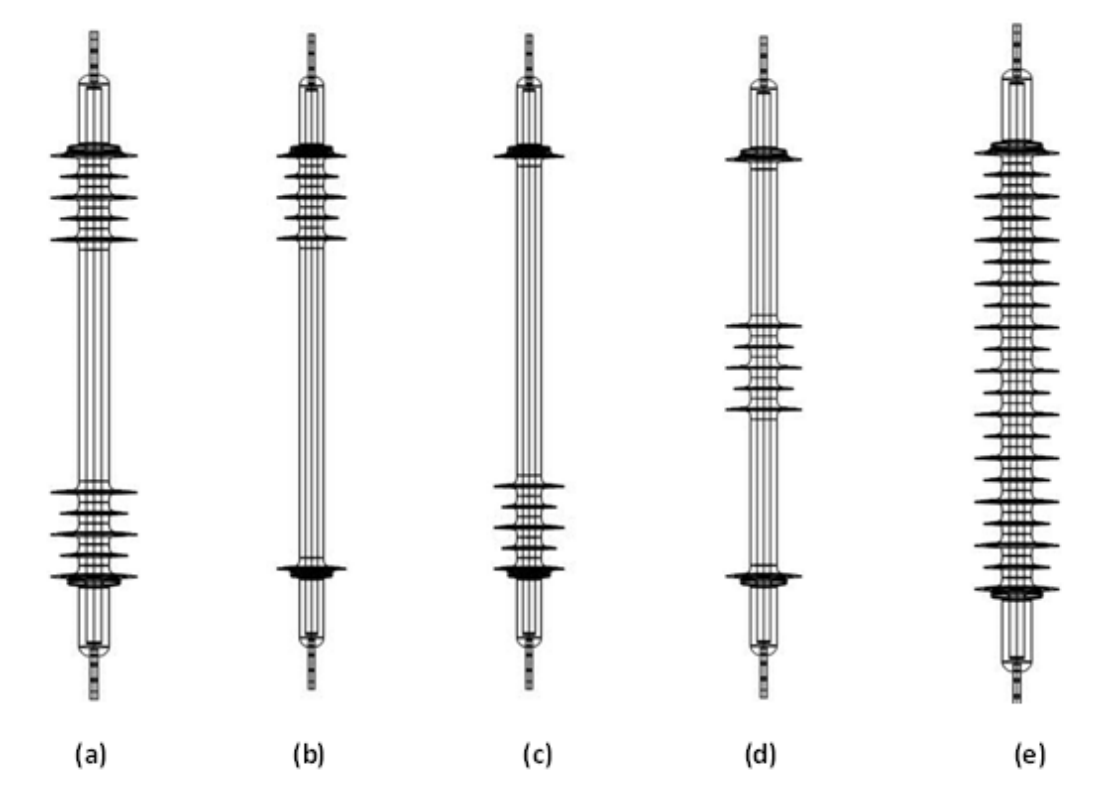


Figure 31 : Modèles 3D simplifiés et complet de l'isolateur composite 69 kV.

À titre d'illustration, les figures 32 et 33 présentent respectivement les distributions des composantes axiale et radiale du champ électrique du modèle simplifié (a) et complet (e). Il est possible de noter une grande similitude entre les distributions des composantes du champ électrique dans les zones qui disposent de jupes au voisinage des électrodes

H.T. et de mise à la terre. Cependant pour la zone dépourvue de jupes au potentiel flottant, une grande différence entre les distributions des composantes du champ électrique est constatée.

En conclusion, dans l'étude numérique des isolateurs plus longs, seules les jupes situées dans la région de grand intérêt sont importantes. Les autres peuvent être supprimés sans affecter la qualité des résultats.

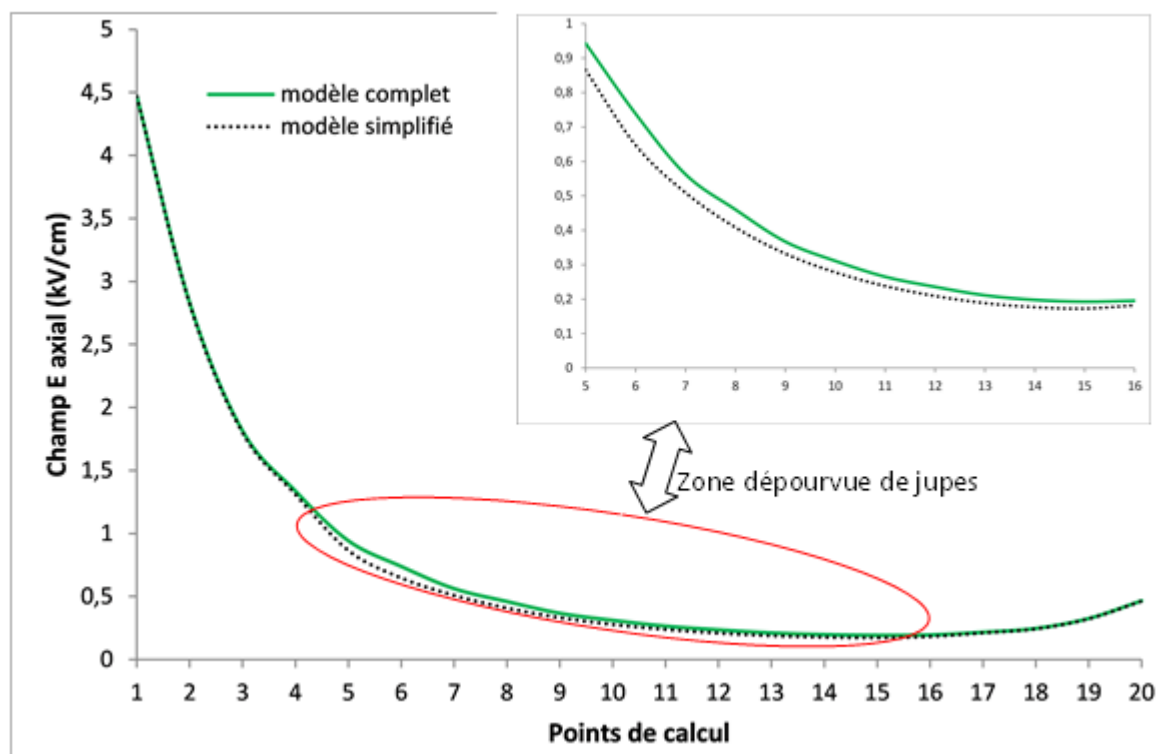


Figure 32 : Composantes axiales du champ électrique du modèle 3D complet (e) et simplifié (a) de l'isolateur composite 69 kV

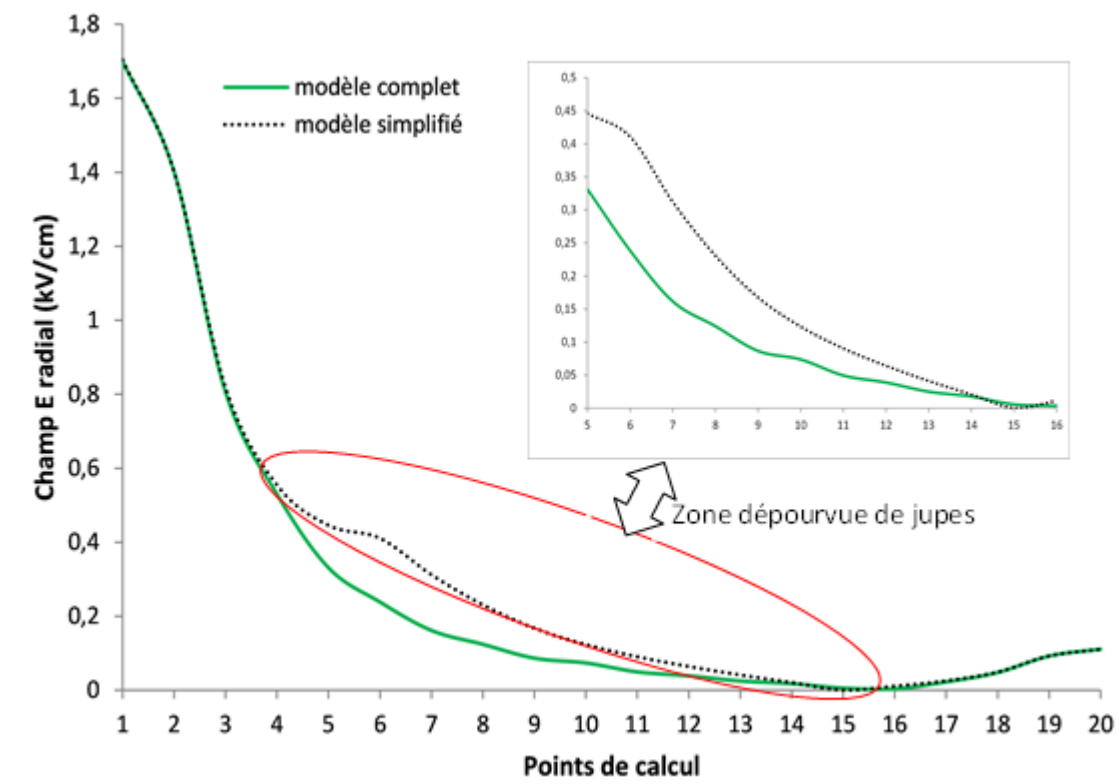


Figure 33 : Composantes radiales du champ électrique du modèle 3D complet (e) et simplifié (a) de l'isolateur composite 69 kV

Tableau 8 : Valeurs moyennes des composantes du champ électrique dans les différentes zones de l'isolateur 69 kV

Modèle		Composante axiale			Composante radiale		
		E _{smoy} (kV/cm) Modèle complet	E _{cmoy} (kV/cm) Modèle simplifié	Erreur relative max (%)	E _{smoy} (kV/cm) Modèle complet	E _{cmoy} (kV/cm) Modèle simplifié	Erreur relative max (%)
5 Jupes aux électrodes HT et T	<i>Zone de jupes à l'électrode HT</i>	2,61	2,6	0,55	1,11	1,12	0,91
	<i>Zone de jupes à l'électrode T</i>	0,31	0,31	1,17	0,07	0,07	1,42
	<i>Zone d'absence de jupe</i>	0,39	0,35	10,1	0,1	0,15	65,89
5 jupes à l'électrode HT	<i>Zone de jupes à l'électrode HT</i>	2,61	2,6	0,58	1,11	1,11	0,45
	<i>Zone d'absence de jupe</i>	0,37	0,33	10,6	0,09	0,15	72,16
5 jupes à l'électrode Terre	<i>Zone de jupes à l'électrode T</i>	0,31	0,31	2,53	0,07	0,07	0,41
	<i>Zone d'absence de jupe</i>	0,95	0,86	10,58	0,35	0,36	69,73
5 jupes au potentiel flottant	<i>Zone de jupe au potentiel flottant</i>	0,29	0,29	2,49	0,06	0,06	3,9
	<i>Zone d'absence de jupe à l'électrode HT</i>	1,64	1,48	9,86	0,66	1,11	67,48
	<i>Zone d'absence de jupe à l'électrode T</i>	0,26	0,23	11,56	0,04	0,07	83,18

4.3. Étude de l'influence de la taille et de la position du défaut sur les composantes axiale et radiale du champ électrique

4.3.1. Introduction

Dans cette section, il s'agit d'étudier l'influence de la position et de la taille d'un défaut interne sur les composantes axiale et radiale du champ électrique le long d'un isolateur composite 69 kV dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 6. Les défauts internes ont été modélisés sous la forme d'un cylindre de rayon 1 mm avec des longueurs différentes : 30 mm (défaut 1) et 60 mm (défaut 2) correspondant respectivement à 3,5% et 7,5% de la longueur totale de l'isolateur. Ces défauts ont été positionnés près de l'électrode H.T. (position 1), au milieu de l'isolateur (position 2) et au voisinage de l'électrode de mise à la terre (position 3), tel qu'indiqué à la figure 28.

4.3.2. Méthodologie générale de détection des défauts

Pour chaque défaut interne, les composantes axiale et radiale du champ électrique de l'isolateur sans défaut et défectueux ont d'abord été calculées en chacun des points présentés à la figure 30. Ensuite, les distributions des valeurs du champ électrique obtenues en chaque point le long de l'isolateur sans défaut et avec défaut ont été comparées pour rechercher les déformations qui indiquent la présence d'un défaut interne. Finalement, à partir des résultats obtenus, le rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ a été déterminé en présence de chaque défaut interne en fonction de sa position. $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ est le rapport des valeurs du champ électrique lorsque l'écart entre la distribution du champ avec défaut (E_d) et celle sans défaut ($E_{s/d}$) est maximal. La figure 34 illustre la procédure de détermination de E_d et $E_{s/d}$ pour la composante axiale du champ électrique. La même procédure a été utilisée pour la composante radiale du champ électrique.

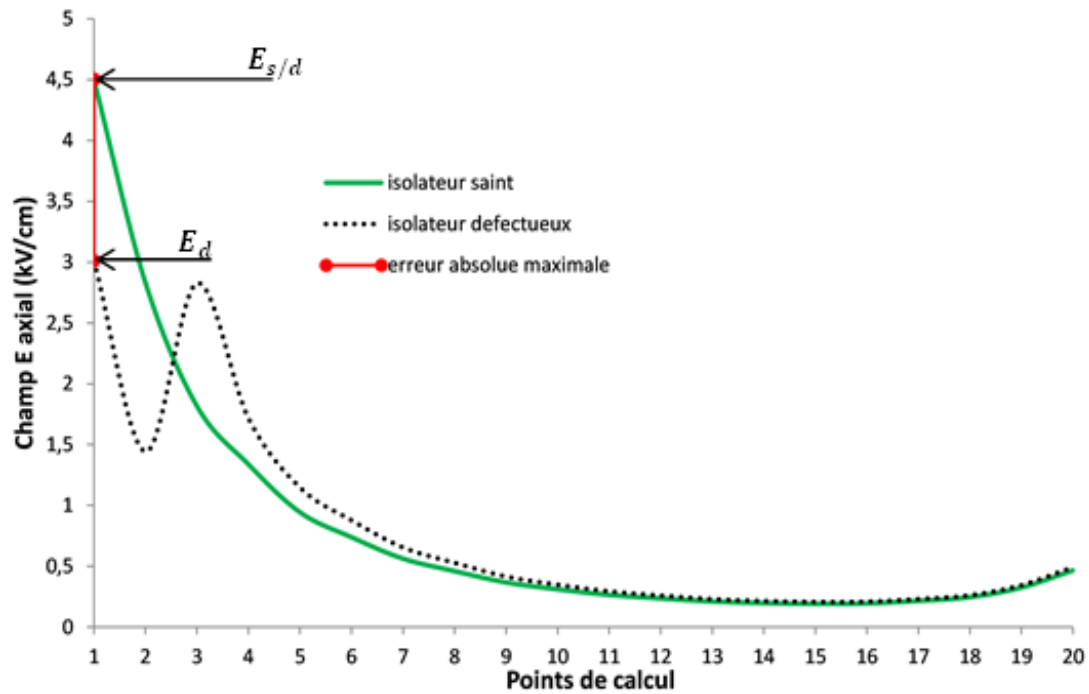


Figure 34 : Procédure de détermination de E_d et $E_{s/d}$.

4.3.3. Analyse de résultats

Les figures 35 et 36 présentent les distributions des composantes axiale et radiale du champ électrique pour le défaut 1 respectivement dans les positions 1, 2 et 3. Les résultats obtenus montrent que les distorsions induites par le défaut 1 en position 1 et 3 sont observables quel que soit la composante du champ électrique calculée. Cependant, lorsque le défaut 1 est en position 2, seules les distorsions qu'il induit dans la composante radiale du champ électrique sont plus qu'observables. Ceci met en évidence l'importance de la composante radiale du champ électrique dans la détection d'un défaut interne. En effet, comme il a été présenté dans le chapitre précédent, en présence d'un défaut interne, la composante radiale du champ électrique subit une déformation plus importante que sa composante axiale.

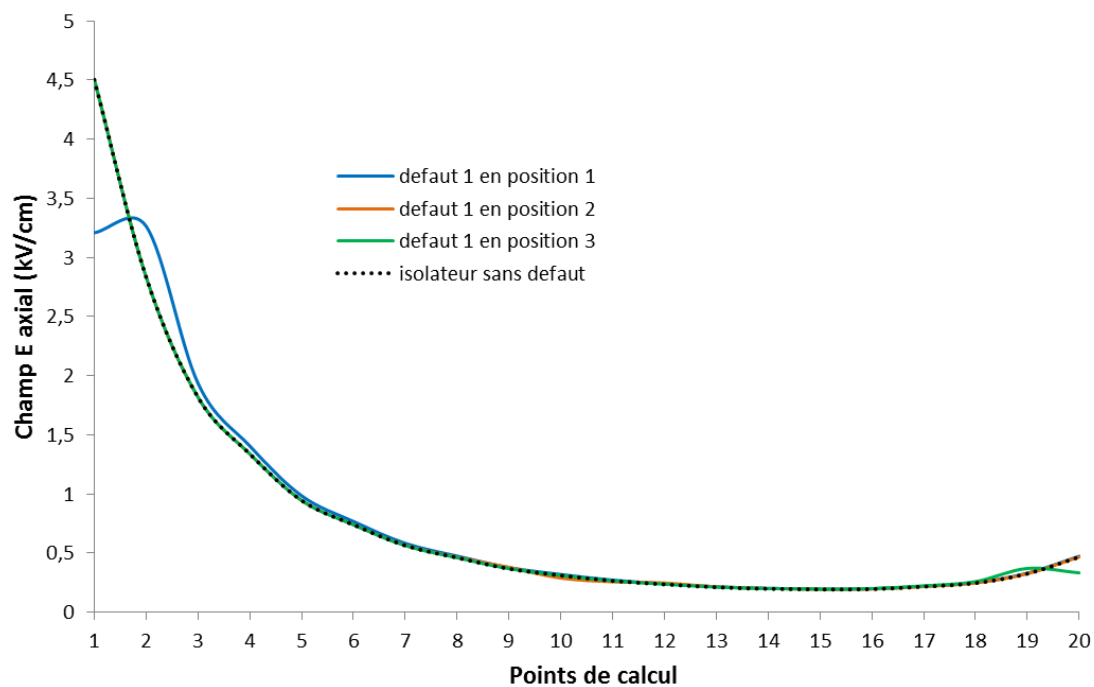


Figure 35 : Composante axiale du champ électrique avec le défaut 1 en position 1, 2 et 3.

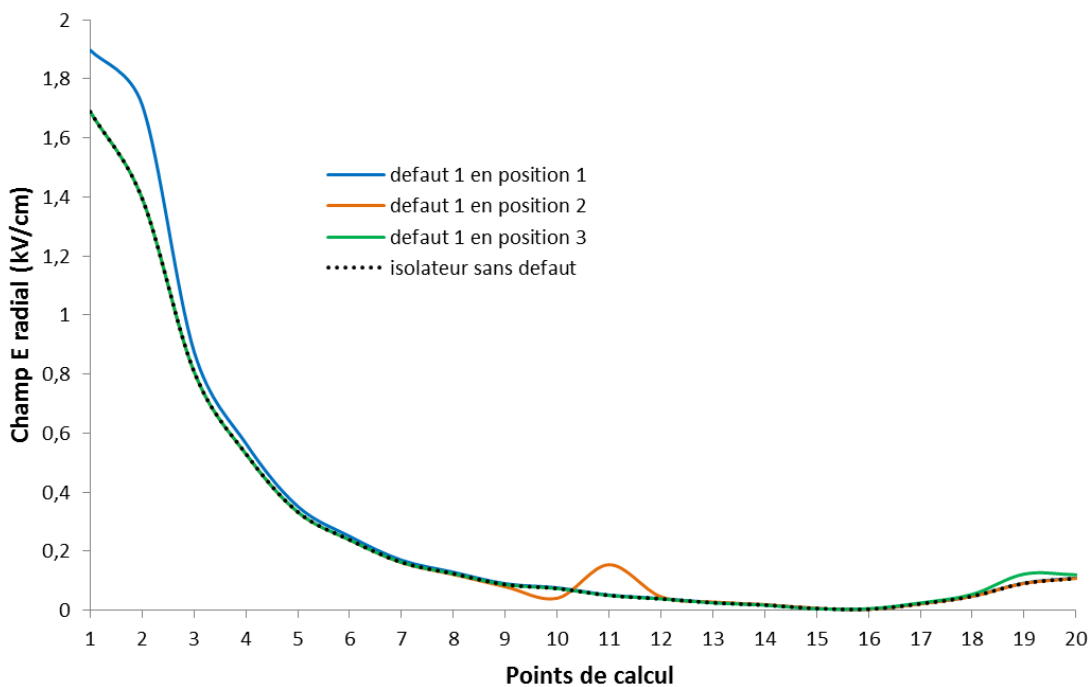


Figure 36 : Composante radiale du champ électrique avec le défaut 1 en position 1, 2 et 3.

Le tableau 9 résume les valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{d/s}}$ pour chaque défaut interne en fonction de sa position. À partir des résultats, il peut être noté que les distorsions des composantes du champ électrique augmentent avec la taille du défaut pour la même position de ce dernier (le rapport $\frac{E_d}{E_{d/s}}$ diminue lorsque la taille du défaut augmente pour la composante axiale tandis qu'il augmente pour la composante radiale).

Tableau 9 : Valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{d/s}}$

$\frac{L_{\text{défaut}}}{L_{\text{total isolateur}}}(\%)$	Position du défaut	Composante axiale	Composante radiale
		$\frac{E_d}{E_{d/s}}$	$\frac{E_d}{E_{d/s}}$
3,5 (défaut 1)	1	0,71	1,22
	2	0,93	1,1
	3	0,71	1,2
7 (défaut 2)	1	0,5	2,46
	2	0,67	2,1
	3	0,55	2,38

D'après la revue de la littérature, la mesure de la composante axiale du champ électrique à l'extrémité des jupes de l'isolateur permet de détecter les défauts de longueur minimale correspondant respectivement à environ 5% de la longueur de l'isolateur lorsque les défauts sont situés au niveau de la H.T. 7,5% pour les défauts situés à la mise à la terre et 12% pour les défauts situés entre les jupes [15]. Le tableau 10 présente une comparaison du rapport $\frac{E_d}{E_{d/s}}$ en présence du défaut 1 (de longueur correspondant à 3,5 % de la

longueur totale de l'isolateur) pour la composante axiale du champ électrique calculée le long de l'isolateur en chacun des points présentés à la figure 30 et à l'extrémité des grandes jupes. Les résultats obtenus montrent que le défaut 1, qui n'est pas visible ($\frac{E_d}{E_{d/s}} \approx 1$) en calculant la composante axiale du champ électrique à l'extrémité des jupes (vérificateur d'isolateur actuellement utilisé), pourrait devenir observable dans les positions 1 et 3 lorsque la composante axiale du champ électrique est calculée près de la surface de l'enveloppe de l'isolateur (capteur EO).

Tableau 10 : Comparaison du rapport $\frac{E_d}{E_{d/s}}$ pour la composante axiale du champ électrique calculée entre les jupes et à l'extrémité de ces dernières

$\frac{L_{\text{défaut}}}{L_{\text{total isolateur}}}(\%)$	Position du défaut	Entres les jupes	extrémités des jupes
		$\frac{E_d}{E_{d/s}}$	$\frac{E_d}{E_{d/s}}$
3,5 (défaut 1)	1	0,71	0,94
	2	0,93	0,97
	3	0,71	0,94

4.4. Influence de la position de la ligne de référence par rapport au défaut

Cette section a pour but d'établir comment la position du point de mesure (ou calcul) du champ électrique autour de l'enveloppe de l'isolateur peut affecter la détection d'un défaut interne. En effet, le vérificateur d'isolateur actuellement utilisé permet de mesurer la composante axiale du champ électrique sur la face avant ou arrière de l'isolateur [13]. De par la méthode utilisée, le vérificateur d'isolateur mesure une valeur moyenne de la

composante axiale du champ électrique sur toute la largeur de ses électrodes de mesures. Ce n'est donc pas une mesure ponctuelle. Cependant, du fait des dimensions millimétrées de la sonde EO (figure 37), la mesure du champ électrique est ponctuelle avec le capteur EO. Par conséquent, il devient important d'étudier l'influence de la position du point de mesure de la composante du champ électrique par rapport au défaut interne.

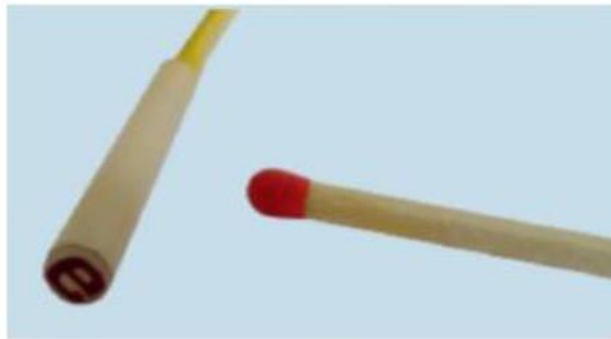


Figure 37 : Sonde fibrée EO millimétrique [57].

L'étude a été réalisée avec le modèle numérique de l'isolateur 69 kV dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 6. Deux défauts cylindriques de même diamètre (2 mm), de longueurs différentes (3,5% et 7% de la longueur totale de l'isolateur) ont été placés au voisinage de l'électrode H.T. (figure 28-a). Pour chaque défaut interne, les composantes axiale et radiale du champ électrique ont été calculées en des points situés le long d'une ligne (figure 30) positionnée respectivement à 0°, 90° et 180° du défaut interne (figure 38).

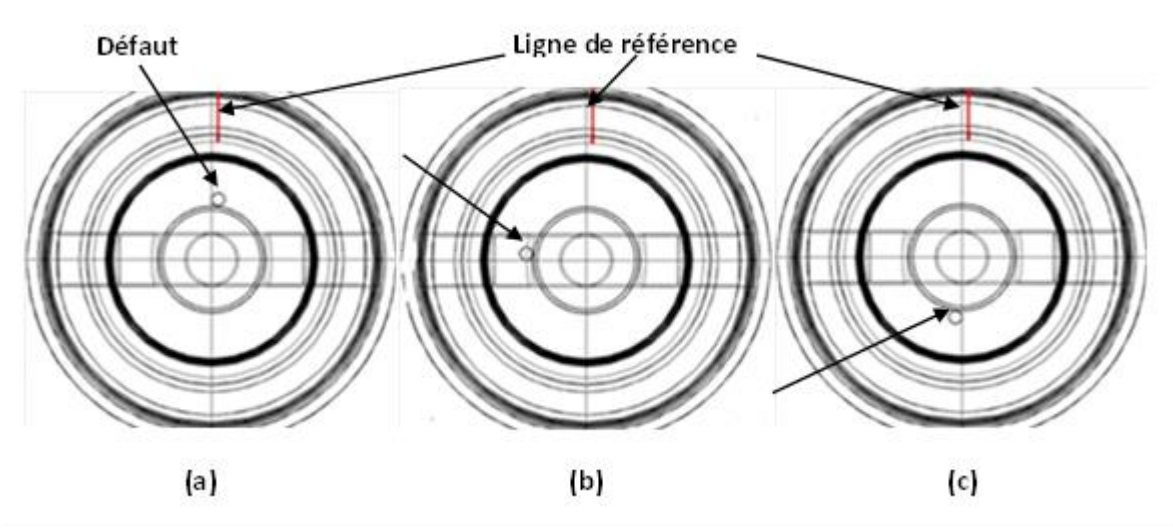


Figure 38 : Vue de dessus de la ligne de calcul à 0° (a), 90° (b) et 180° (c) par rapport au défaut interne

Le tableau 11 résume les valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$. Les résultats obtenus montrent que le rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ de la composante axiale augmente lorsque la ligne de calcul du champ électrique s'éloigne du défaut interne tandis qu'il diminue pour la composante radiale. Cela signifie qu'un défaut interne devient de moins en moins visible lorsque qu'il s'éloigne des points de calcul des composantes du champ électrique. Il est également possible de remarquer une faible variation entre le rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ obtenu à 90 ° et 180 ° en présence des défauts 1 et 2.

Les rapports $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ obtenus avec le défaut 1 indiquent qu'en calculant uniquement la composante axiale du champ électrique (E), ce dernier n'est plus visible lorsqu'il s'éloigne (au-delà de 90°) des points de calcul ($\frac{E_d}{E_{s/d}} = 0,91$). Cela peut s'observer à travers la figure 39 où les courbes du champ électrique de l'isolateur saint et défectueux sont presque similaires pour la composante axiale tandis que sur la figure 40 les distorsions induites par le défaut interne sont observables à 90° et 180° du défaut interne avec la composante radiale. Cependant, la présence du défaut 2 est visible quel que soit la position de la ligne

de calcul des composantes du champ électrique par rapport au défaut interne. En effet, la valeur maximale du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ pour le défaut 2 est respectivement de 0,83 pour la composante axiale tandis que pour la composante radiale la valeur minimale du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ est de 1,51.

En somme, il est possible de dire qu'en déplaçant les points de calcul des composantes du champ électrique autour de l'enveloppe de l'isolateur, il est possible de déterminer la position du défaut interne. En effet, le rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ augmente en s'approchant du défaut interne pour la composante radiale du champ électrique tandis qu'il diminue pour sa composante axiale. En outre, dans le cas de certains défauts, il convient de déplacer les points de calcul des composantes du champ électrique sur tout le contour de l'enveloppe de l'isolateur pour la réalisation d'un diagnostic parfait. Car comme il a été noté précédemment, certains défauts deviennent invisibles lorsqu'ils s'éloignent des points de calcul des composantes du champ électrique.

Tableau 11 : valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$

Position ligne de référence par rapport au défaut (°)	Défaut 1 (3,5%)		Défaut 2 (7%)	
	Composante axiale	Composante radiale	Composante axiale	Composante radiale
	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$
0	0,71	1,22	0,65	2,5
90	0,88	1,2	0,8	1,63
180	0,91	1,18	0,83	1,51

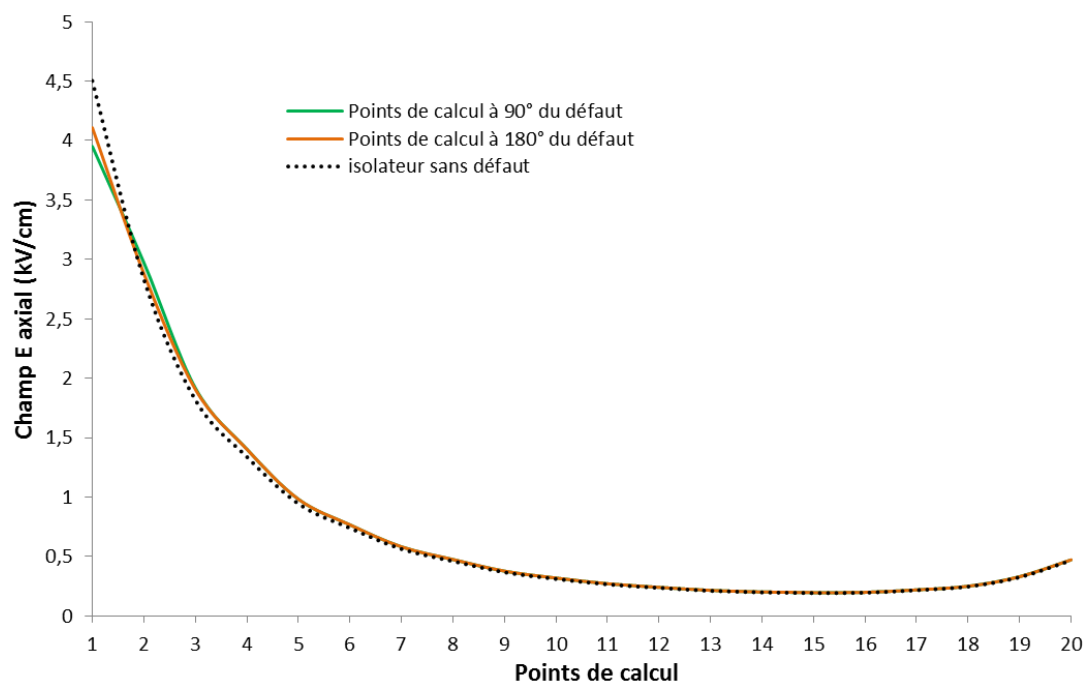


Figure 39 : Composante axiale du champ électrique de l'isolateur 69 kV avec le défaut 1 en position 1

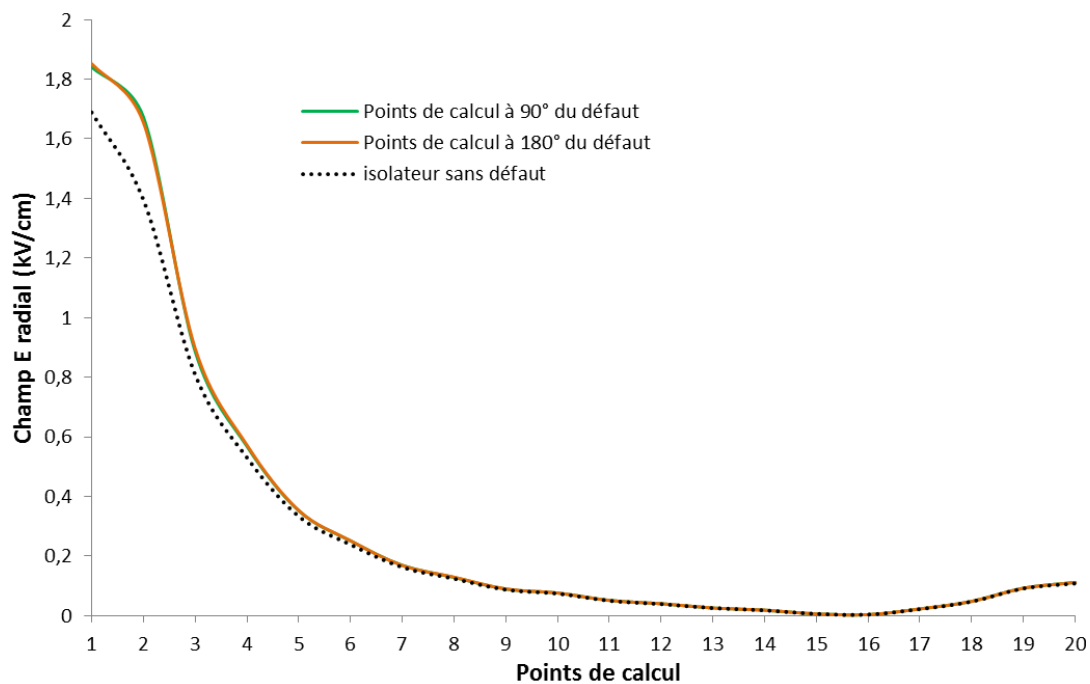


Figure 40 : Composante radiale du champ électrique de l'isolateur 69 kV avec le défaut 1 en position 1

4.5. Calcul des composantes du champ électrique en des points situés le long d'une ligne circulaire centrée sur l'enveloppe de l'isolateur.

4.5.1. Introduction

Tel que présenté précédemment, un défaut interne devient de moins en moins visible lorsque qu'il s'éloigne des points de calcul des composantes du champ électrique. Pour remédier à cette difficulté, il a été envisagé de calculer les composantes du champ électrique en des points placés respectivement à 0° , 90° , 180° et 270° du défaut interne. Ces points sont situés le long d'une ligne circulaire centrée sur l'enveloppe de l'isolateur et positionnée à 3 mm de celle-ci. La ligne circulaire a été placée au milieu de deux jupes consécutives. L'étude a été réalisée avec un isolateur composite 69 kV dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 6. Un défaut cylindrique de diamètre 2 mm et de longueur 30 mm (3,5 % de la longueur totale de l'isolateur) a été positionné respectivement près de l'électrode HT (figure 41), au milieu de l'isolateur et au voisinage de l'électrode de mise à la terre (figure 42). Pour chaque position du défaut interne, les composantes axiale et radiale du champ électrique ont été calculées en des points situés le long d'une ligne circulaire placée respectivement dans les positions 1, 2, 3 et 4 (figures 41 et 42).

4.5.2. Analyse des résultats

Les résultats obtenus et présentés sur les figures 43 à 48 montrent que sans défaut interne, les composantes axiale et radiale du champ électrique sont constantes autour de l'enveloppe de l'isolateur. Cependant, la présence d'un défaut interne entraîne une distorsion dans les courbes des composantes du champ électrique. De plus, l'amplitude de la distorsion diminue jusqu'à disparaître en s'éloignant de la zone d'influence du défaut interne. A partir de cet instant, les courbes du champ électrique de l'isolateur sans défaut et défectueux présentent la même allure (droite horizontale).

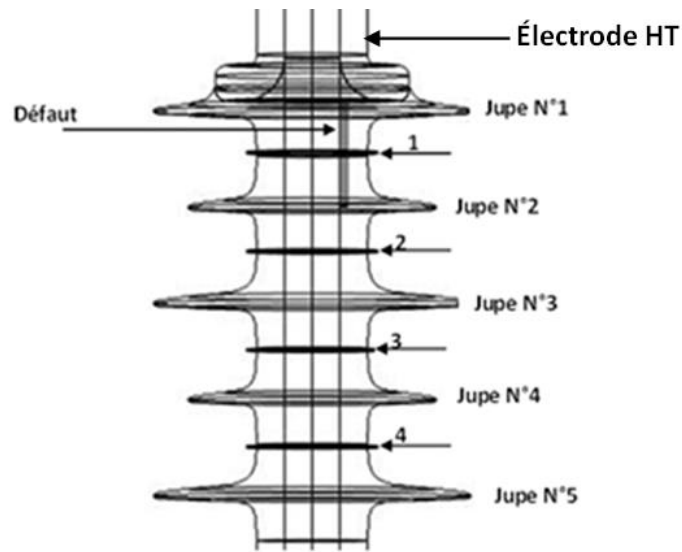


Figure 41 : Position du défaut interne près de l'électrode HT

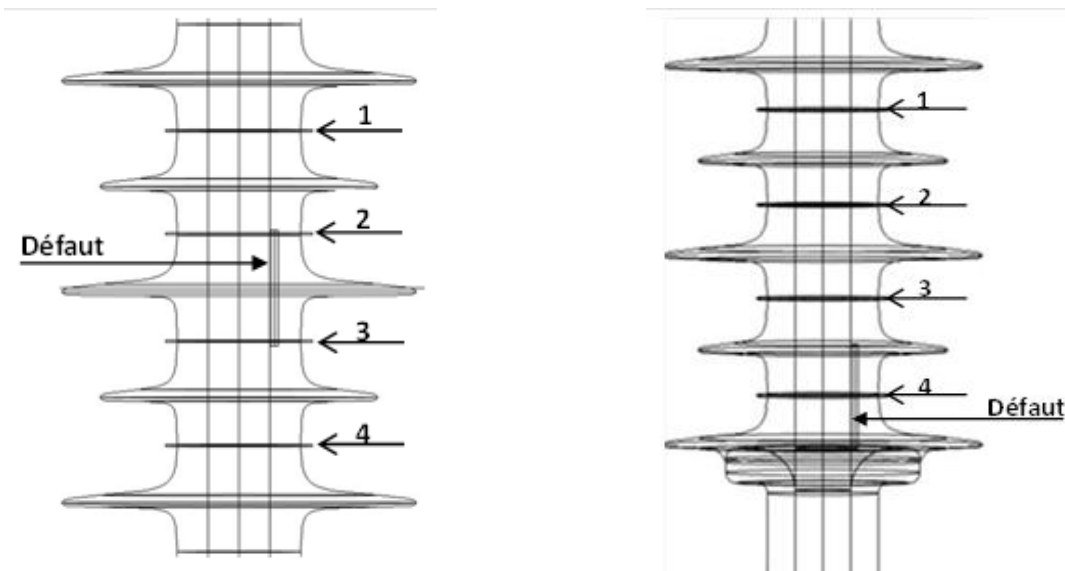


Figure 42 : Positions du défaut interne au milieu de l'isolateur (gauche) et près de l'électrode de mise à la terre (droite)

À partir des figures 45 et 46, il peut être observé que pour un défaut interne situé au milieu de l'isolateur, les distorsions induites par le défaut interne sont plus significative dans la composante radiale du champ électrique que sa composante axiale. Cependant

pour un défaut interne près de l'électrode H.T. les distorsions induites par le défaut interne sont plus significative dans la composante axiale du champ électrique que sa composante radiale (figures 43 et 44).

Ainsi, pour un défaut interne situé au milieu de l'isolateur, la composante radiale du champ électrique est la plus pertinente pour le diagnostic tandis que la composante axiale est la plus sensible aux distorsions pour un défaut interne situé près de l'électrode H.T. Pour un défaut près de l'électrode de mise à la terre, les deux composantes du champ électrique subissent des distorsions significatives (figures 47 et 48).

De tout ce qui précède, il ressort que la mesure des composantes du champ électrique en des points situés le long d'une ligne circulaire centrée sur l'enveloppe de l'isolateur permet de détecter et de localiser les défauts internes au sein des isolateurs composites. Il permet surtout de régler le problème de position de la ligne de mesure le long de l'isolateur par rapport au défaut interne. En outre, l'utilisation d'une ligne de référence circulaire pour mesurer les composantes du champ électrique pourrait servir d'outil pour la détection automatique de la présence d'un défaut interne (c'est-à-dire sans une signature de référence). En effet, jusqu'ici la méthode de diagnostic par la mesure du champ électrique consiste à mesurer les valeurs du champ électrique le long de l'isolateur à tester pour les comparer avec celles obtenues préalablement avec un autre isolateur sans défaut ayant les mêmes caractéristiques que l'isolateur testé. Ceci implique donc que pour chaque isolateur à tester, une signature obtenue avec un isolateur sans défaut de même caractéristique doit préalablement être disponible. Par conséquent, chaque action de diagnostic est menée sur des isolateurs qui disposent déjà d'une signature (valeurs obtenues avec l'isolateur sans défaut de même caractéristique).

Le calcul des composantes du champ électrique en des points situés le long d'une ligne de calcul circulaire centrée sur l'enveloppe de l'isolateur pourrait devenir une alternative à cette difficulté. En effet, il a été observé sur les figures 43 à 48 qu'en absence de défaut

interne la courbe du champ électrique le long de la ligne de calcul décrit une droite horizontale. Cependant, en présence d'un défaut interne, la courbe du champ électrique subit une déformation. De ce qui précède, il serait alors possible d'effectuer le diagnostic d'un isolateur en observant uniquement l'allure de la courbe du champ électrique le long d'une ligne de calcul circulaire décrite plus haut. Ainsi, si l'allure de la courbe du champ électrique décrit une droite horizontale, cela signifierait l'absence de défaut tandis qu'une allure contraire indiquerait la présence d'un défaut interne. Cette méthode à l'avantage d'être réalisée sans les valeurs références du champ électrique préenregistrées comme c'est le cas actuellement. Ainsi, il deviendrait possible d'entreprendre toute action de diagnostic d'un isolateur sans avoir besoins de ses données de références.

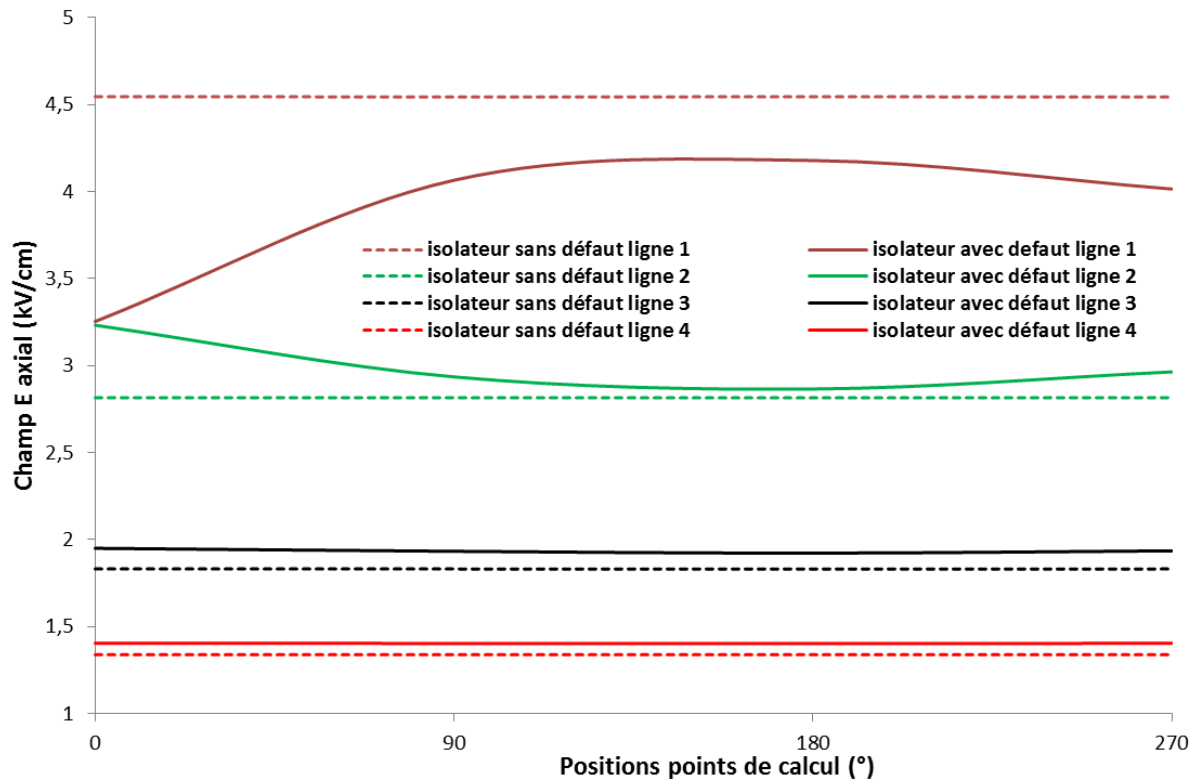


Figure 43 : Composante axiale du champ électrique d'un isolateur 69 kV avec et sans défaut lorsque le défaut est situé près de l'électrode H.T.

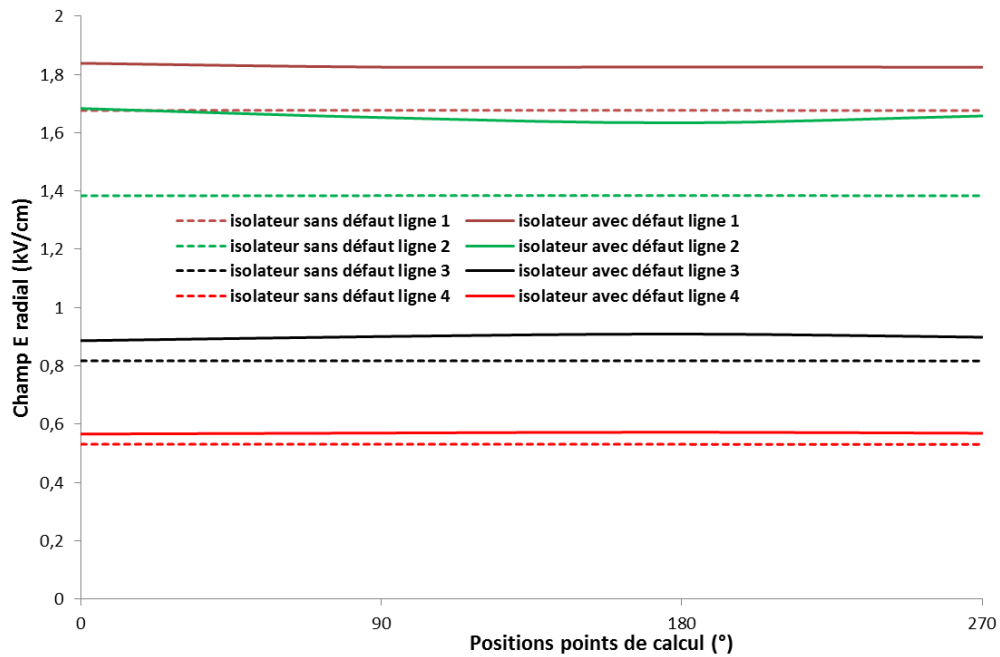


Figure 44 : Composante radiale du champ électrique d'un isolateur 69 kV avec et sans défaut lorsque le défaut est situé près de l'électrode H.T.

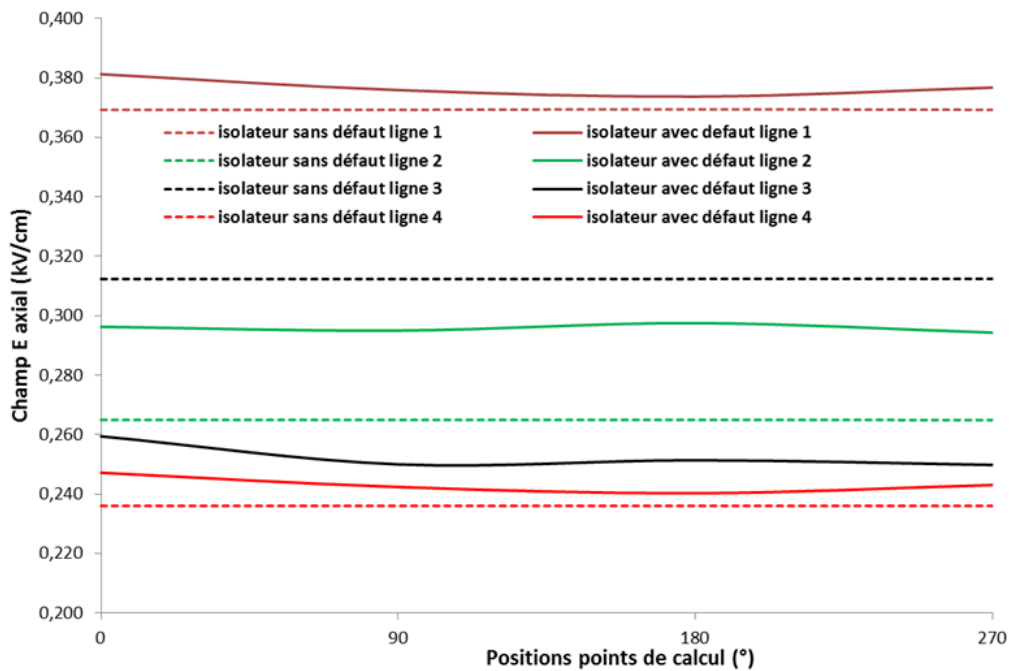


Figure 45 : Composante axiale du champ électrique d'un isolateur avec et sans défaut lorsque le défaut est situé au milieu de l'isolateur.

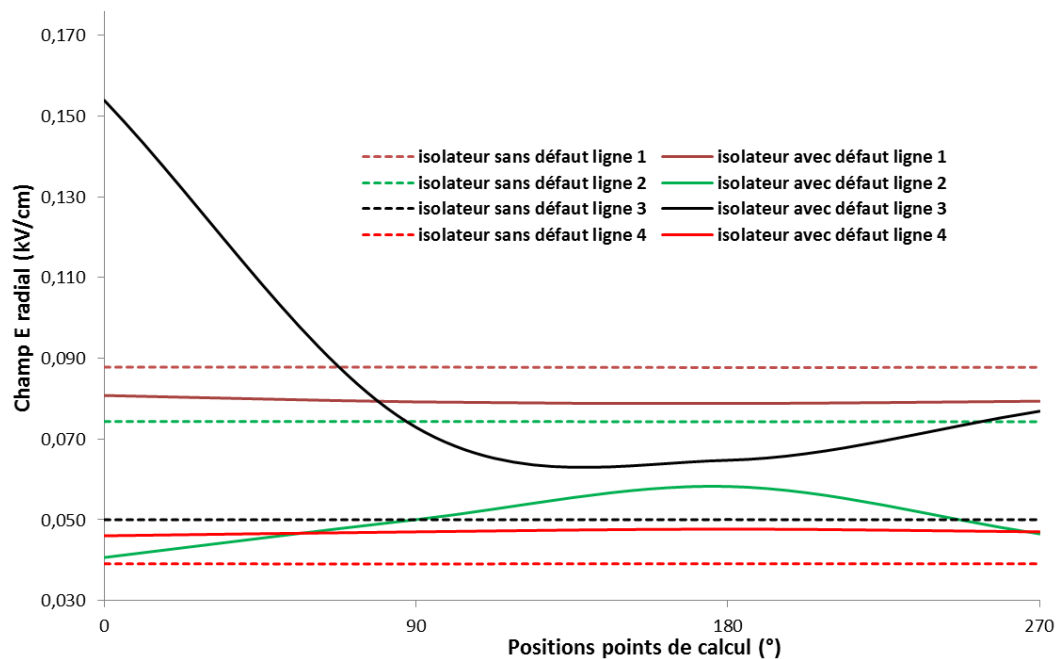


Figure 46 : Composante radiale du champ électrique d'un isolateur 69 kV avec et sans défaut lorsque le défaut est situé au milieu de l'isolateur

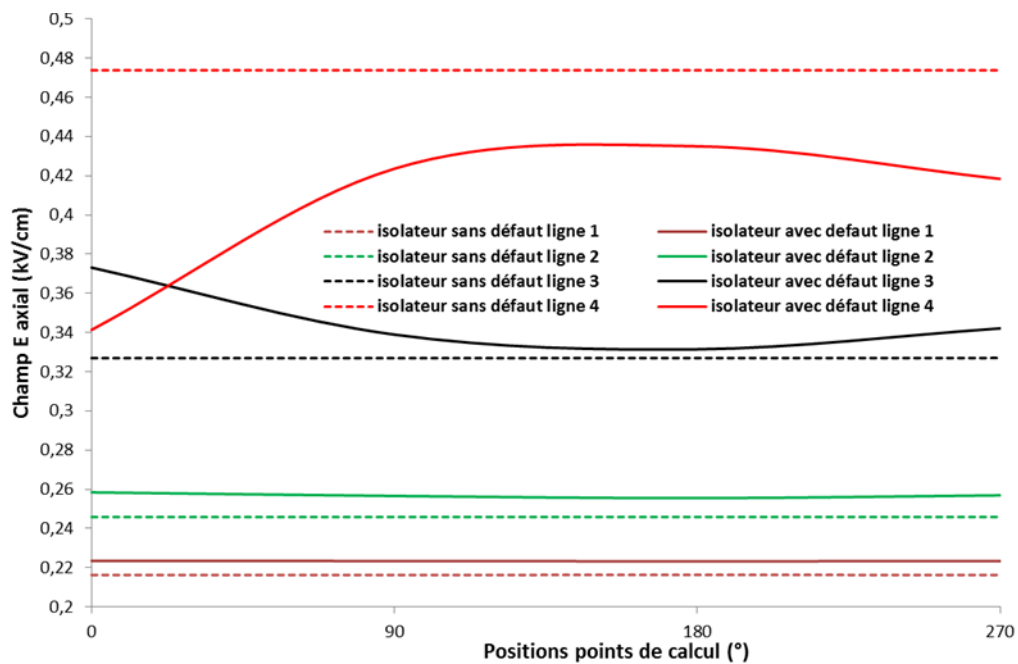


Figure 47 : Composante axiale du champ électrique d'un isolateur 69 kV avec et sans défaut lorsque le défaut est situé près de l'électrode de mise à la terre

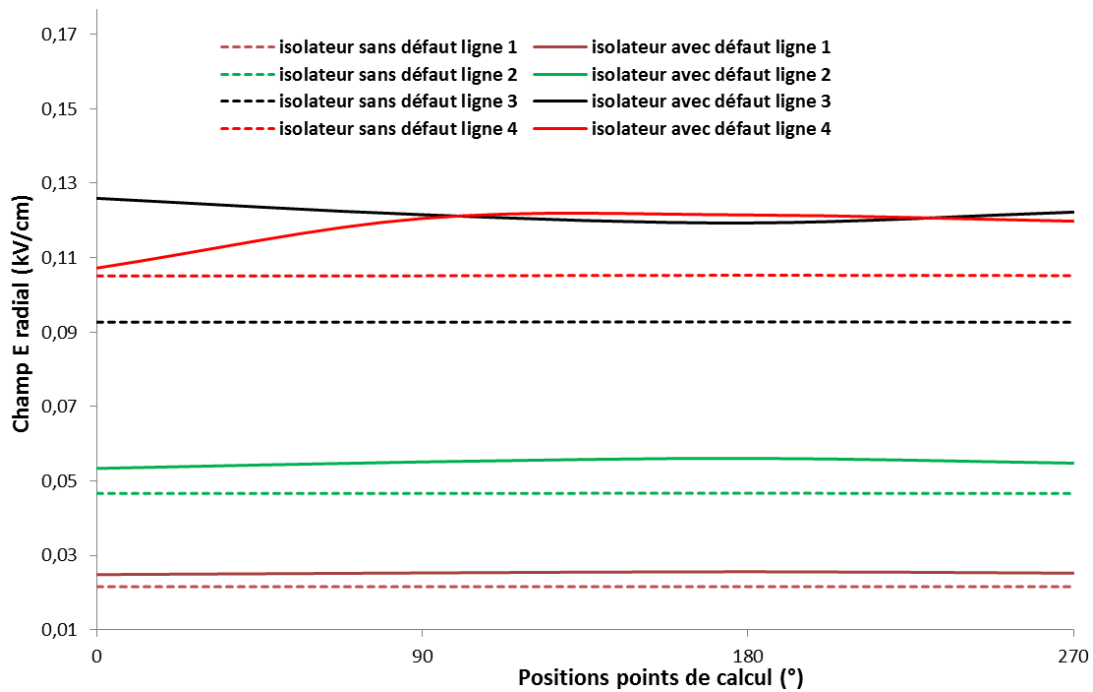


Figure 48 : Composante radiale du champ électrique d'un isolateur 69 kV avec et sans défaut lorsque le défaut est situé près de l'électrode de mise à la terre

4.6. Influence de la profondeur et du diamètre d'un défaut interne

L'objectif dans cette partie est d'étudier l'influence de la profondeur et du diamètre du défaut interne au sein de l'isolateur sur la détection de ce dernier. Pour cela, trois (3) différents types de défauts cylindriques, de même longueur (49 mm) et de diamètres différents : respectivement 0,5 mm (défaut 1), 2 mm (défaut 2) et 4 mm (défaut 3) ont été utilisés. Tous ces défauts ont été positionnés à l'intérieur de la tige d'un isolateur 69 kV dont les caractéristiques sont présentées au tableau 6.

Dans un premier temps, tous les défauts ont la même position. Ainsi, lorsque le diamètre du défaut augmente, la distance entre le défaut et la surface de l'isolateur diminue (figure 49-a). Ensuite, les défauts sont à différentes positions tandis que la distance entre les défauts et la surface de l'enveloppe de l'isolateur reste fixe (figure 49-b).

Le tableau 12 présente les valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$. Les résultats obtenus montrent que lorsque le diamètre du défaut interne augmente, le rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ de la composante radiale du champ électrique augmente tandis qu'il diminue pour la composante axiale. En outre, lorsque la profondeur du défaut interne augmente, le rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ augmente pour le même défaut interne.

D'après ce qui précède, il est possible de dire que la profondeur d'un défaut interne au sein d'un isolateur a une grande influence sur la détection de ce dernier. En effet, plus le défaut interne est profond au sein de l'isolateur, moins il influence la distribution des composantes du champ électrique à la surface de l'isolateur.

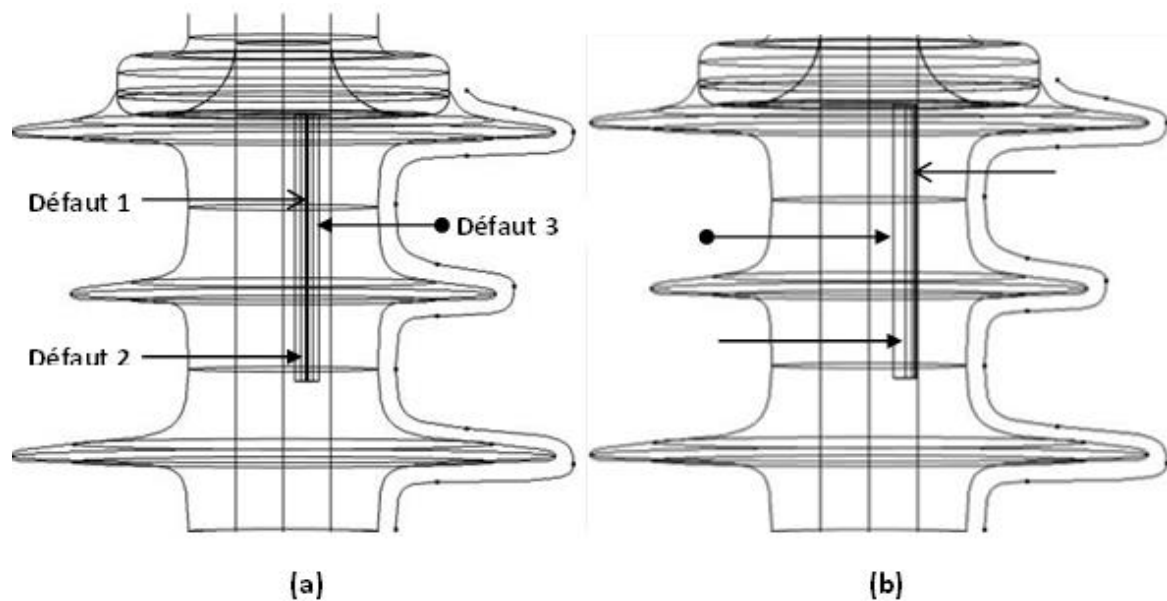


Figure 49 : Défauts internes ayant la même position (a) et la même distance avec la surface de l'isolateur (b)

Tableau 12 : Valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$

		Composante axiale	Composante radiale
		$\frac{E_d}{E_{s/d}}$	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$
Même position des défauts	Défauts		
	Défaut 1	0,85	1,6
	Défaut 2	0,77	1,96
	Défaut 3	0,69	2,3
Même distance par rapport à la surface de l'isolateur	Défaut 1	0,78	2,01
	Défaut 2	0,71	2,33
	Défaut 3	0.64	2,62

4.7. Défaut de même longueur situé sur différents isolateurs composites

Cette partie s'intéresse au comportement d'un défaut cylindrique (diamètre 2 mm et longueur 30 mm) situé sur trois différents isolateurs composites (69 kV, 115 kV et de 230 kV) dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 6. La longueur du défaut correspond respectivement à 3,5 % de la longueur totale de l'isolateur 69 kV, 2,8 % pour l'isolateur 115 kV et 1,5% pour l'isolateur 230 kV. Pour chaque isolateur, le défaut a été positionné respectivement au voisinage de l'électrode H.T. au milieu de l'isolateur et près de l'électrode de mise à la terre (figure 28). Les composantes axiale et radiale du champ ont été calculées en des points situés le long de chaque isolateur comme illustré sur la figure 30.

Le tableau 13 présente les valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ des composantes du champ électrique. D'après les résultats obtenus, le rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ des composantes axiale et radiale du champ électrique semble identique pour la même position du défaut interne indépendamment

de la longueur de l'isolateur. La légère différence de rapport noté avec l'isolateur 230 kV peut s'expliquer par l'utilisation de son modèle simplifié.

En résumé, il apparaît que les distorsions maximales dans les composantes du champ électrique dues à la présence d'un défaut interne dépendent essentiellement de ses caractéristiques géométriques (sa longueur principalement) et de sa position. Ces dernières sont donc, pour un défaut identique, indépendante de la longueur de l'isolateur et donc du niveau de tension.

Tableau 13 : Valeurs des écarts absolus maximums et du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$

		Composante axiale	Composante radiale
Position du défaut	Isolateurs	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$
Électrode HT	69 kV	0,71	1,22
	115 kV	0,72	1,27
	230 kV	0,75	1,34
Au milieu de l'isolateur	69 kV	0,93	3,08
	115 kV	0,93	3,13
	230 kV	0,92	3,35
Électrode de mise à la Terre	69 kV	0,71	1,3
	115 kV	0,71	1,34
	230 kV	0,71	1,56

4.8. Évaluation de la section défectueuse d'un isolateur composite

La présence d'un défaut interne au sein d'un isolateur composite affecte la fiabilité entière de ce dernier. La méthode de diagnostic employée devrait alors permettre une évaluation précise de l'ampleur du défaut interne afin non seulement de décider du remplacement ou non de l'isolateur défectueux [5, 8, 20] mais aussi d'assurer la sécurité des opérateurs pour des travaux en ligne. En effet, la présence d'un défaut interne conducteur ou partiellement conducteur affecte la tenue aux chocs de manœuvre de l'isolateur [15]. Par conséquent, avant les travaux en ligne, l'état de l'isolateur soumis à la maintenance doit être évalué afin de détecter les risques possibles de contournement. Plus précisément, il s'agit de détecter tous les défauts internes conducteurs ou semi-conducteurs de longueur comprise entre 20 à 30 % de la longueur totale de l'isolateur qui constituent un danger pendant les travaux en ligne [58]. Cette exigence spécifique est très importante pour l'évaluation de la faisabilité et la pertinence de la méthode de diagnostic.

Cette partie porte sur l'analyse des distributions des composantes du champ électrique obtenues en présence d'un défaut interne afin de voir si elles permettent d'évaluer la section défectueuse de l'isolateur. L'étude a été réalisée avec le modèle numérique d'un isolateur composite 69 kV dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 6. Les défauts internes ont été modélisés sous la forme d'un cylindre de diamètre 2 mm ayant différentes longueurs : 43 mm (défaut 1), 60 mm (défaut 2) et 173 mm (défaut 3). Les longueurs des défauts 2 et 3 correspondent respectivement à 7% et 20% de la longueur totale de l'isolateur. Chaque défaut interne a été positionné près de l'électrode H.T. (figure 50), au milieu de l'isolateur (figure 53) et au voisinage de l'électrode de mise à la terre (figure 56). Les composantes du champ électrique ont été calculées en des points situés le long de l'isolateur tel qu'illustré à la figure 30.

Les résultats présentés aux figures 51, 52, 54, 55, 57 et 58 démontrent que les distorsions induites dans les composantes du champ électrique par un défaut interne restent localisés

dans la zone où se situe ce dernier. Il est possible de noter également que pour les défauts près des électrodes H.T. et de mise à la terre, l'extrémité de chaque défaut interne (fin du défaut) est mise en évidence par un effet de pointe dans les courbes des composantes du champ électrique. Cependant pour les défauts situés au milieu de l'isolateur, un effet de point est observé à chaque extrémité du défaut interne.

Ainsi, ces résultats démontrent qu'en mesurant les composantes du champ électrique près de la surface de l'enveloppe de l'isolateur, il peut être possible d'évaluer de manière précise la longueur de la section défectueuse d'un isolateur composite. Ceci pourrait donc aider à améliorer la prise de décision pour le remplacement ou non d'un isolateur défectueux. En outre, cette évaluation précise permettrait de confirmer ou infirmer l'intégrité mécanique et électrique d'un isolateur avant d'effectuer les travaux en ligne. Ceci permet donc de confirmer la faisabilité et la pertinence de la méthode proposée.

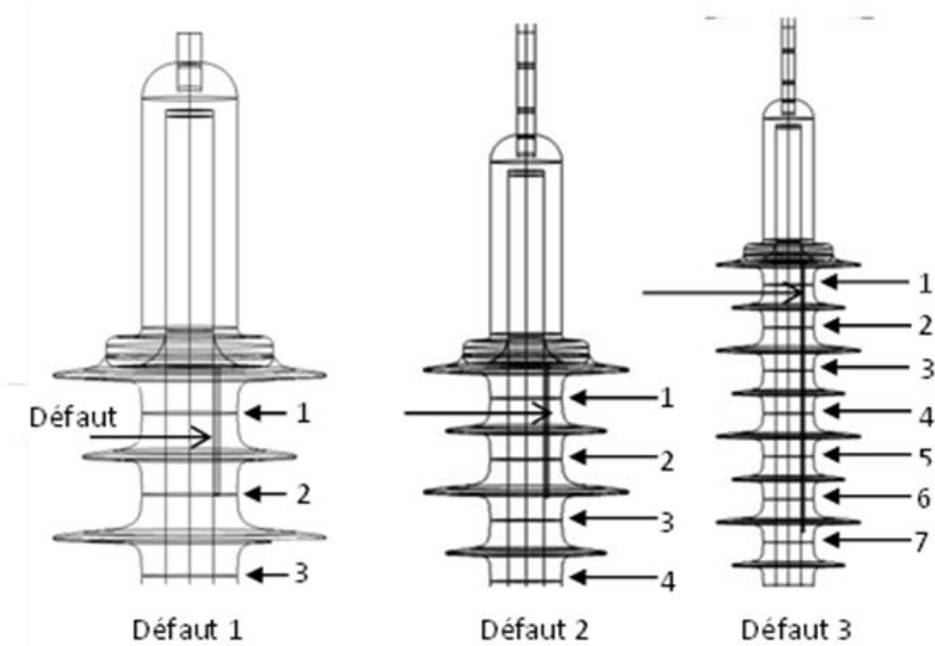


Figure 50 : Position des défauts internes près de l'électrode H.T. et des points de calcul des composantes du champ électrique

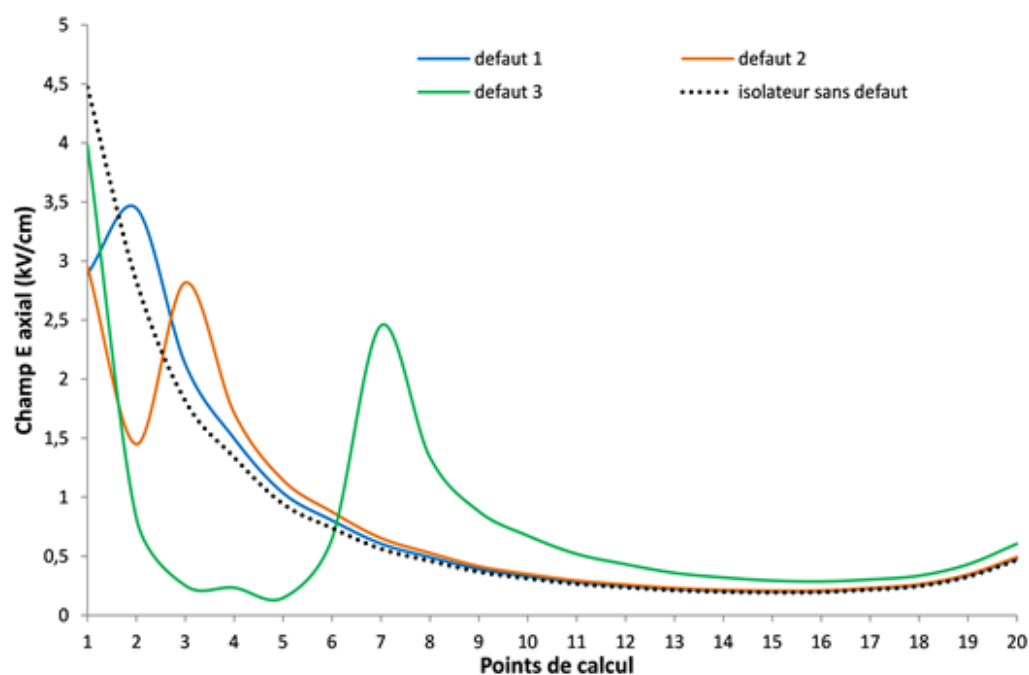


Figure 51 : Composantes axiales du champ électrique pour les défauts internes près de l'électrode H.T.

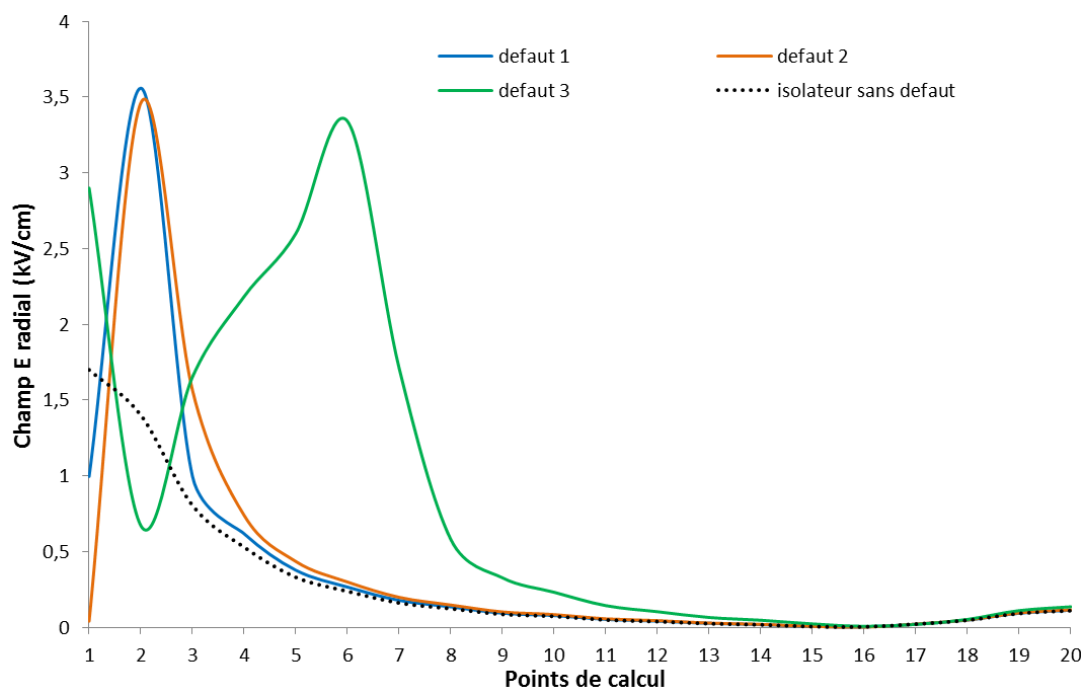


Figure 52 : Composantes radiales du champ électrique pour les défauts internes près de l'électrode H.T.

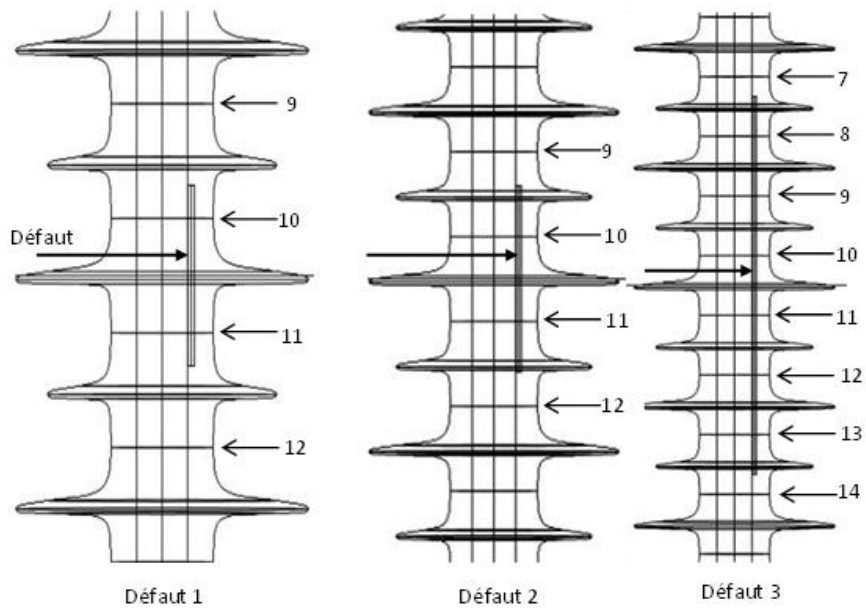


Figure 53 : Position des défauts internes au milieu de l'isolateur et des points de calcul des composantes du champ électrique

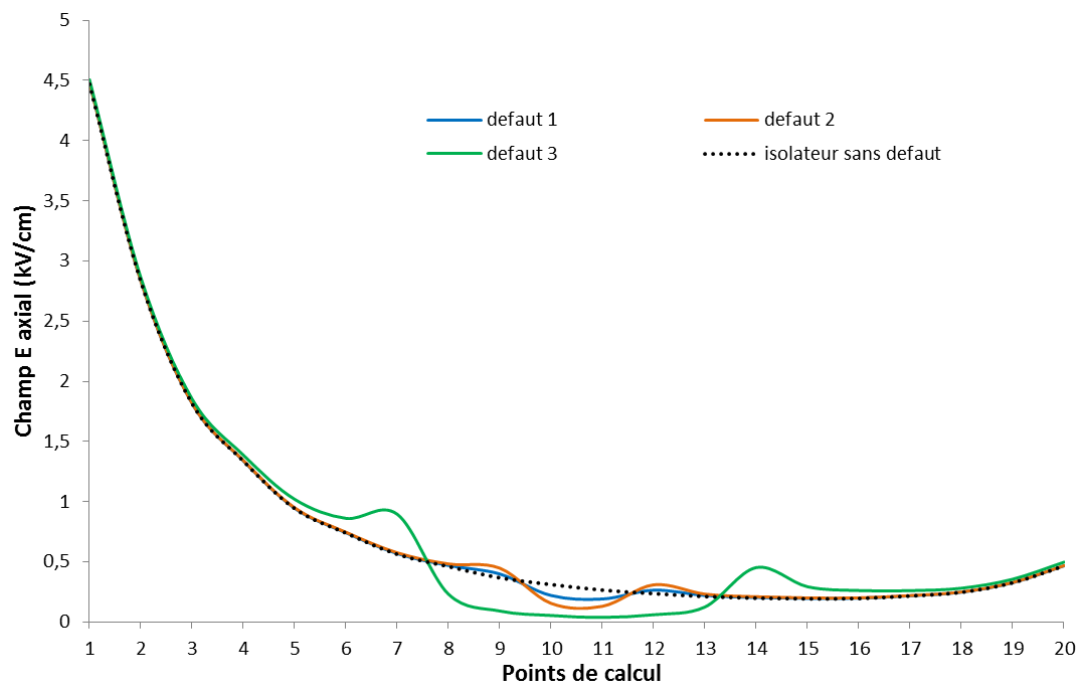


Figure 54 : Composantes axiales du champ électrique pour les défauts internes au milieu de l'isolateur

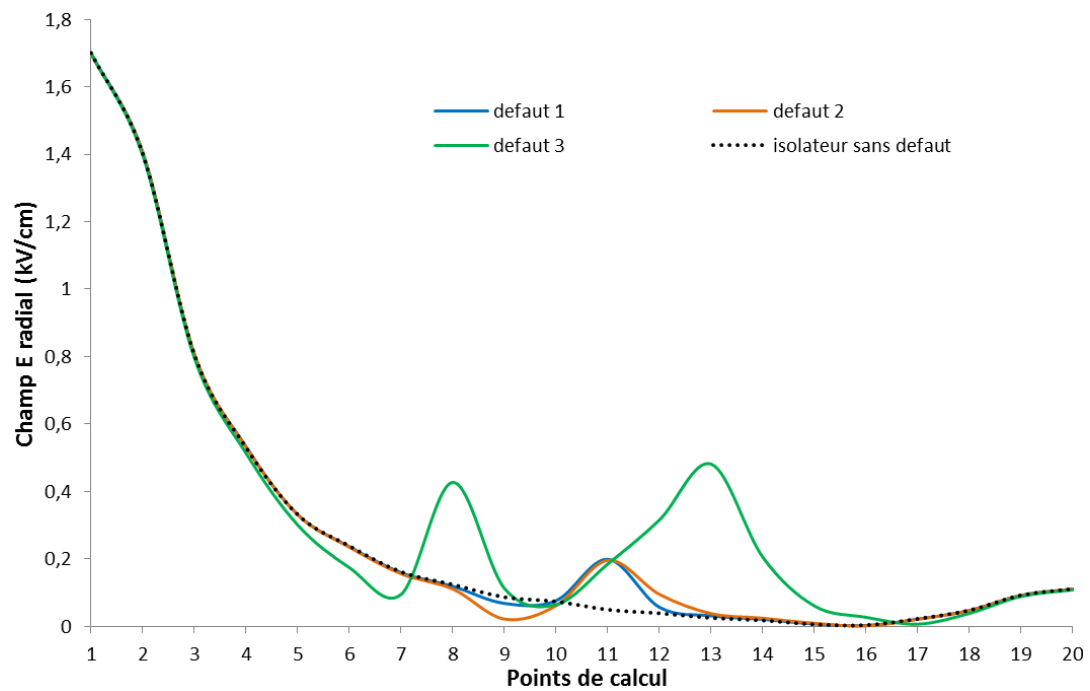


Figure 55 : Composantes radiales du champ électrique pour les défauts internes au milieu de l'isolateur

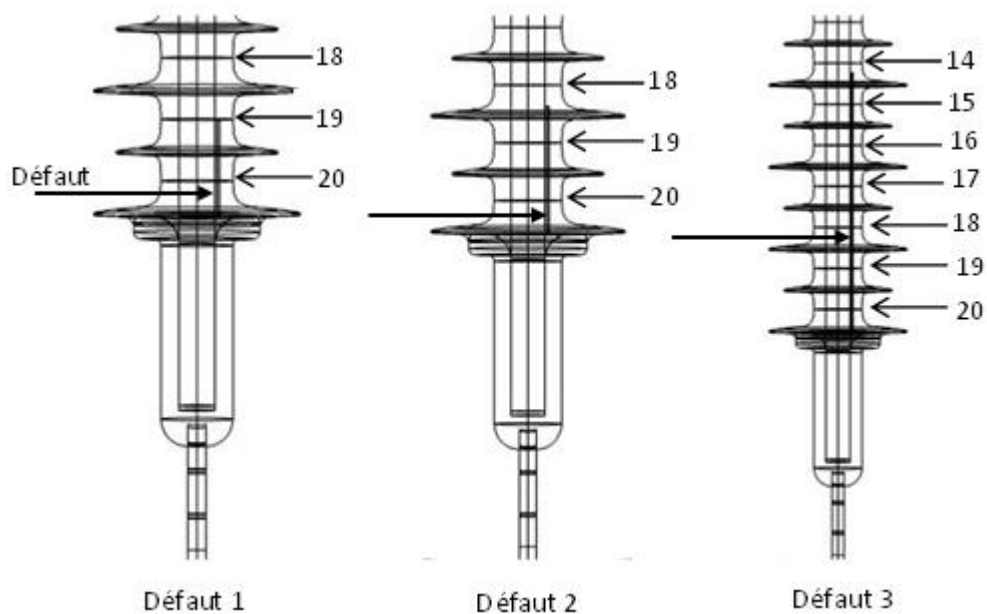


Figure 56 : Position des défauts internes près de l'électrode de mise à la terre et des points de calcul des composantes du champ électrique

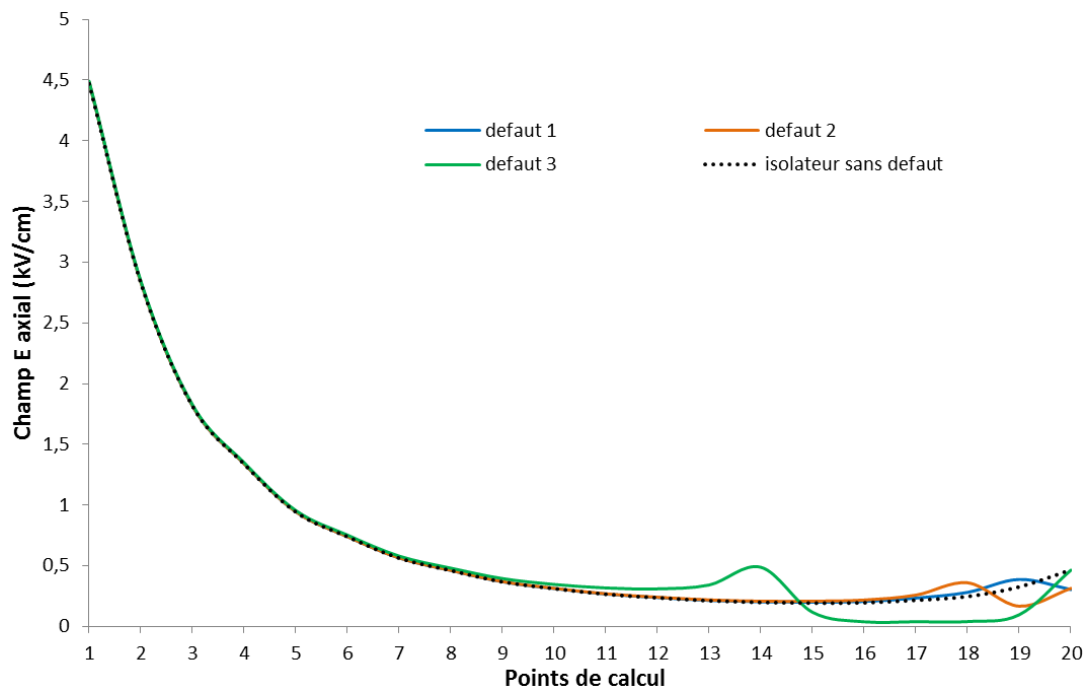


Figure 57 : Composantes axiales du champ électrique pour les défauts internes près de l'électrode de mise à la terre

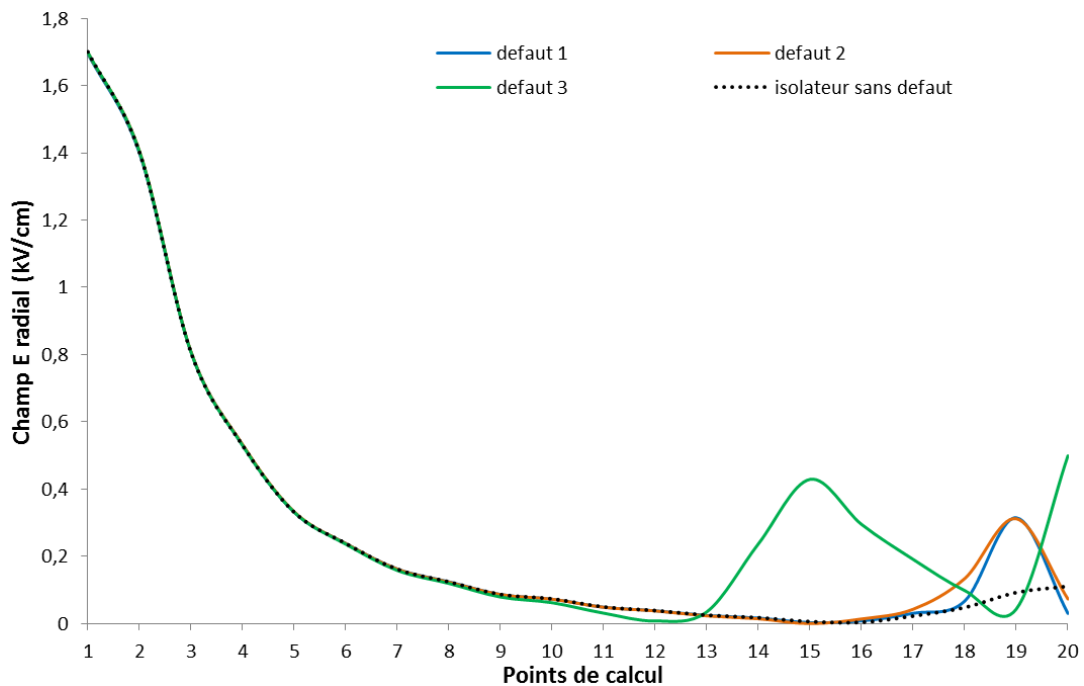


Figure 58 : Composantes radiales du champ électrique pour les défauts internes près de l'électrode de mise à la terre

4.9. Détection de la présence d'un chemin semi-conducteur (eau) à l'intérieur de la tige d'un isolateur composite.

La fracture tendre de la tige d'un isolateur composite peut entraîner en service des défaillances catastrophiques [59]. Parmi les causes de la fracture tendre de la tige, l'infiltration d'eau dans la tige combinés aux contraintes mécanique [59] et l'acide nitrique due aux décharges couronnes, l'ozone et l'humidité [60] sont les plus répandues. Ainsi, la présence d'eau dans la tige d'un isolateur joue un rôle important dans le processus conduisant à la fracture tendre.

Afin d'éviter la fracture tendre de la tige, les isolateurs composites doivent être protégés contre les infiltrations d'eau au niveau de leurs électrodes sous tension. Cependant, cela est très difficile, voire impossible à réaliser durant de longues périodes, en raison des diverses contraintes auxquelles les isolateurs sont soumis en service.

Dans cette partie, il est proposé de vérifier la possibilité de détecter le plutôt possible la présence d'eau dans la tige d'un isolateur composite. L'étude a été réalisée avec le modèle numérique d'un isolateur 69 kV dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 6. La présence d'eau a été simulée par un défaut interne semi-conducteur de forme cylindrique ayant une longueur de 50 mm et un diamètre de 0,5 mm. Le défaut interne a été positionné près de l'électrode H.T. (figure 59) tel que rapporté dans la majorité des cas dans la littérature [61, 62].

Les distributions des composantes du champ électrique ont été calculées et présentées sur les figures 60 et 61. Les résultats obtenus montrent que la présence d'un chemin semi-conducteur (eau) fin dans la tige d'un isolateur près de l'électrode HT est visible. En outre, les distorsions induites par la présence du défaut interne sont plus importantes dans la composante radiale du champ électrique que sa composante axiale.

Ainsi, en utilisant la mesure des composantes du champ électrique près de la surface de l'enveloppe d'un isolateur, il est alors possible de détecter la présence de très fin chemin

semi-conducteur (eau) à l'intérieur de sa tige. Ceci constitue, un résultat encourageant qu'il faudra valider expérimentalement afin de proposer une méthode qui permet de détecter la présence de chemin semi-conducteur (eau) dans la tige d'un isolateur composite qui contribue fortement au processus conduisant à la fracture tendre de sa tige.

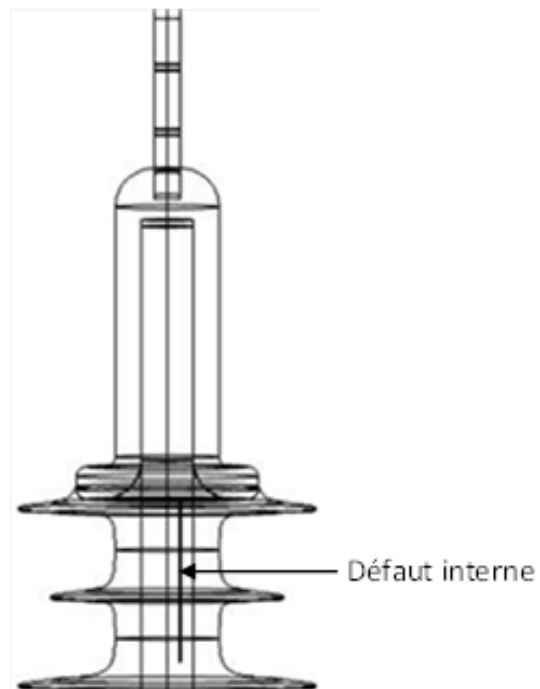


Figure 59 : Chemin semi-conducteur (défaut interne) près de l'électrode H.T.

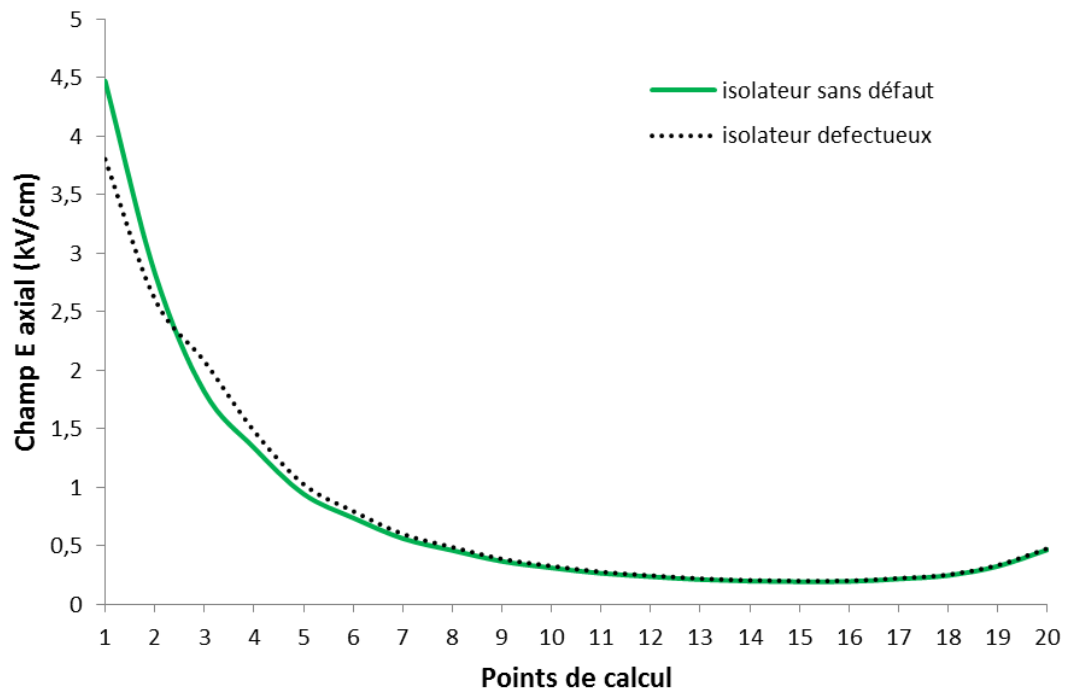


Figure 60 : Composantes axiales de l'isolateur 69 kV sans défaut et avec défaut (chemin semi-conducteur)

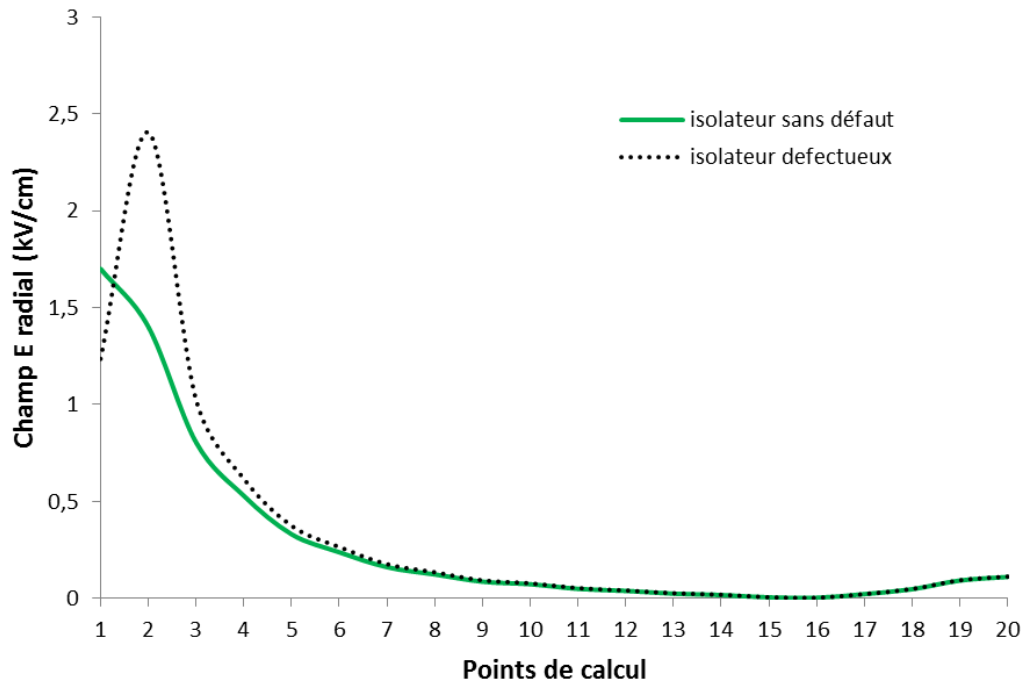


Figure 61 : Composantes axiales de l'isolateur 69 kV sans défaut et avec défaut (chemin semi-conducteur).

4.10. Influence de la présence des anneaux de garde sur le diagnostic des isolateurs composites

4.10.1. Introduction

Les anneaux de garde se présentent sous la forme d'un anneau métallique ouvert ou fermé. Ils sont généralement en aluminium afin de réduire leur poids et offrir une grande résistance à la corrosion. Ils sont fixés sur les pièces métalliques aux extrémités des isolateurs et donc soumis au même potentiel que ces dernières.



Figure 62 : Exemples d'anneaux de garde [55].

Installés sur un isolateur, les anneaux de garde ont pour rôle de réduire le champ électrique à ses extrémités métalliques afin d'éviter les activités de décharges électriques (décharges couronnes et partielles).

Quand les isolateurs composites sont employés, l'utilisation des anneaux de garde est recommandée à l'électrode haute tension pour des tensions de 230 kV et aux deux électrodes pour les tensions supérieures à 500 kV (figure 69) [63].

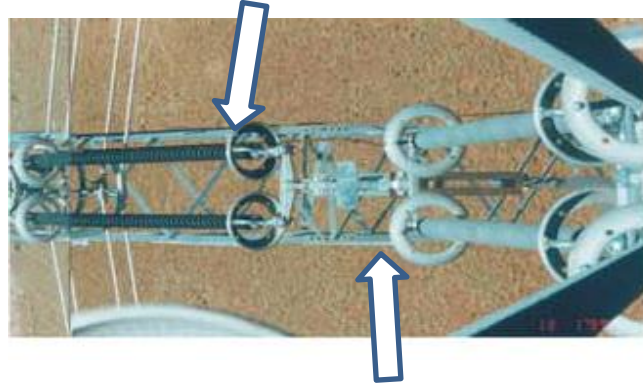


Figure 63 : Exemple d'utilisation des anneaux de garde sur des isolateurs composites de ligne [55].

La réduction de l'amplitude du champ électrique aux extrémités des isolateurs par les anneaux de garde influence la méthode de diagnostic des isolateurs par la mesure du champ électrique. Chen et al. [64] ont montré que la présence des anneaux de garde à l'électrode H.T. de l'isolateur réduit l'influence du défaut sur la composante axiale du champ électrique.

Cette partie présente l'étude de l'influence de la présence d'un anneau de garde à l'électrode H.T. d'un isolateur composite sur la détection d'un défaut interne en fonction de sa position. L'anneau de garde utilisé a pour diamètre extérieur 280 mm et pour section 36 mm [55]. L'étude a été réalisée avec un isolateur composite 230 kV (dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 6) pour lequel l'utilisation d'anneau de garde est recommandée à l'électrode H.T. [63].

La figure 64 présente le modèle numérique de l'isolateur composite 230 kV muni d'un anneau de garde à l'électrode H.T. Les défauts internes ont été modélisés sous la forme de cylindre de même diamètre (2 mm) et de différentes longueurs : 30 mm (défaut 1) et 60 mm (défaut 2). Ces défauts ont été positionnés respectivement au voisinage de l'électrode H.T. au milieu de l'isolateur et près de l'électrode de mise à la terre (figure 28).

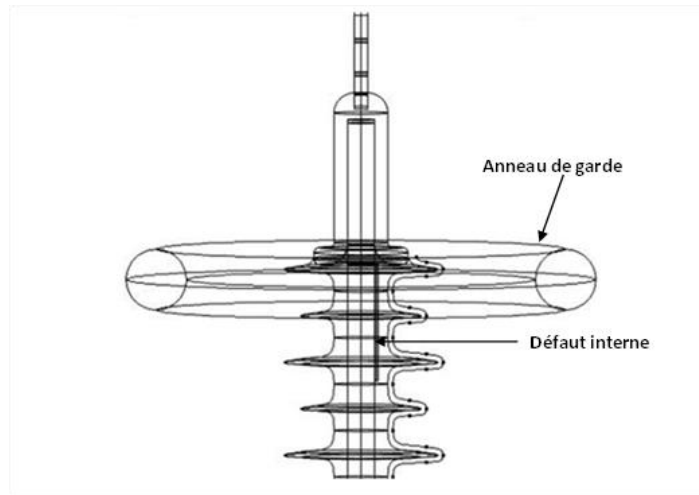


Figure 64 : Vue de près du modèle 3D de l'isolateur 230 kV avec un anneau de garde et défaut interne près de l'électrode HT.

4.10.2. Analyse des résultats

Les résultats des figures 65 et 66 montrent que la présence d'un anneau de garde à l'électrode H.T. réduit les amplitudes du champ électrique au voisinage de cette dernière tandis qu'elles augmentent au milieu de l'isolateur et près de l'électrode de mise à la terre.

Les résultats du tableau 14 indiquent qu'en présence d'un anneau de garde et d'un défaut interne, l'erreur absolue maximum entre le champ électrique de l'isolateur sans et avec défaut diminue au voisinage de l'électrode H.T. tandis qu'elle augmente au milieu de l'isolateur et près de l'électrode de mise à la terre. Cela s'explique par le fait que la présence d'anneau de garde diminue l'amplitude du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T. tandis qu'elle augmente au milieu de l'isolateur et près de l'électrode de mise à la terre. Ainsi, la présence d'anneau de garde à l'électrode H.T. réduit la détectabilité des défauts qui y sont situés tandis qu'elle augmente pour les défauts situés au milieu de l'isolateur et au voisinage de l'électrode de mise à la terre.

Cependant, à partir des résultats du tableau 15, il est possible de constater que, pour un même défaut interne et pour la même position du défaut, le rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ semble constant avec ou sans anneau de garde.

En somme, relativement à la valeur du champ électrique de l'isolateur sans défaut, l'influence du défaut reste la même avec ou sans anneau de garde. Par conséquent, la présence d'un anneau de garde ne semble pas influencer le diagnostic des isolateurs composites lorsque le champ électrique est mesuré près de la surface de l'enveloppe.

Tableau 14 : valeurs des écarts absolus maximums e_{max} (kV/cm) en fonction de la position du défaut

Position du défaut	défaut 1				défaut 2			
	Composante axiale		Composante radiale		Composante axiale		Composante radiale	
	sans anneau	avec anneau	sans anneau	avec anneau	sans anneau	avec anneau	sans anneau	avec anneau
Électrode HT	4,57	1,7	1,43	0,58	6,36	3,06	10,53	5,26
Au milieu de l'isolateur	0,01	0,02	0,04	0,1	0,06	0,15	0,05	0,11
Électrode de mise à la terre	0,12	0,27	0,03	0,06	0,16	0,35	0,2	0,46

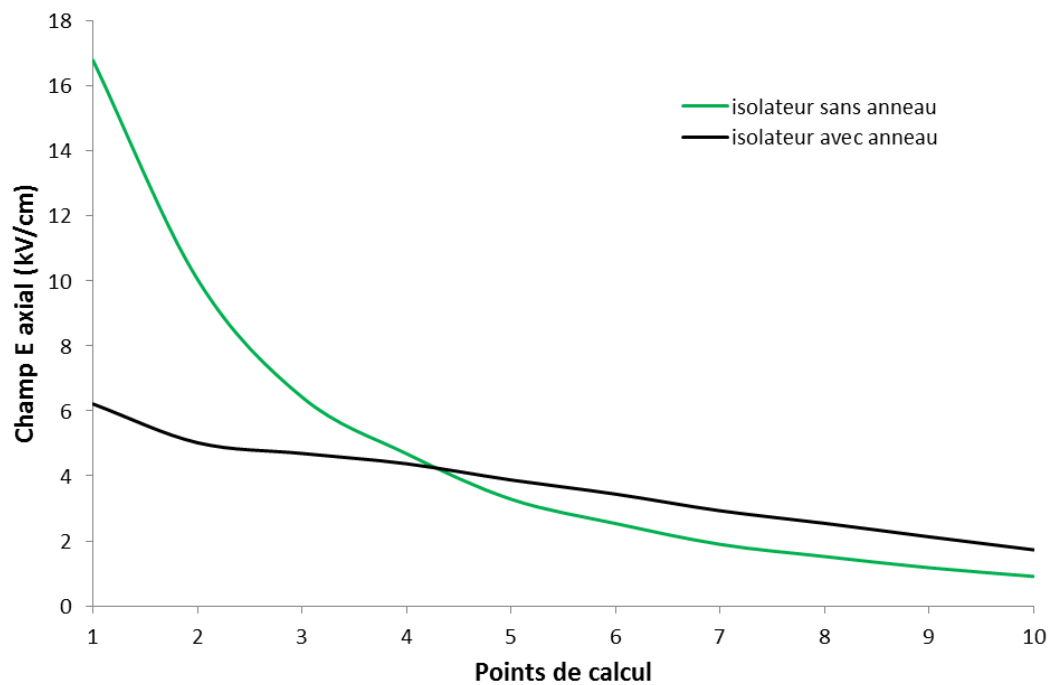


Figure 65 : Champ électrique axial le long des 10 premières jupes à partir de l'électrode H.T. d'un isolateur 230 kV avec/sans anneau de garde

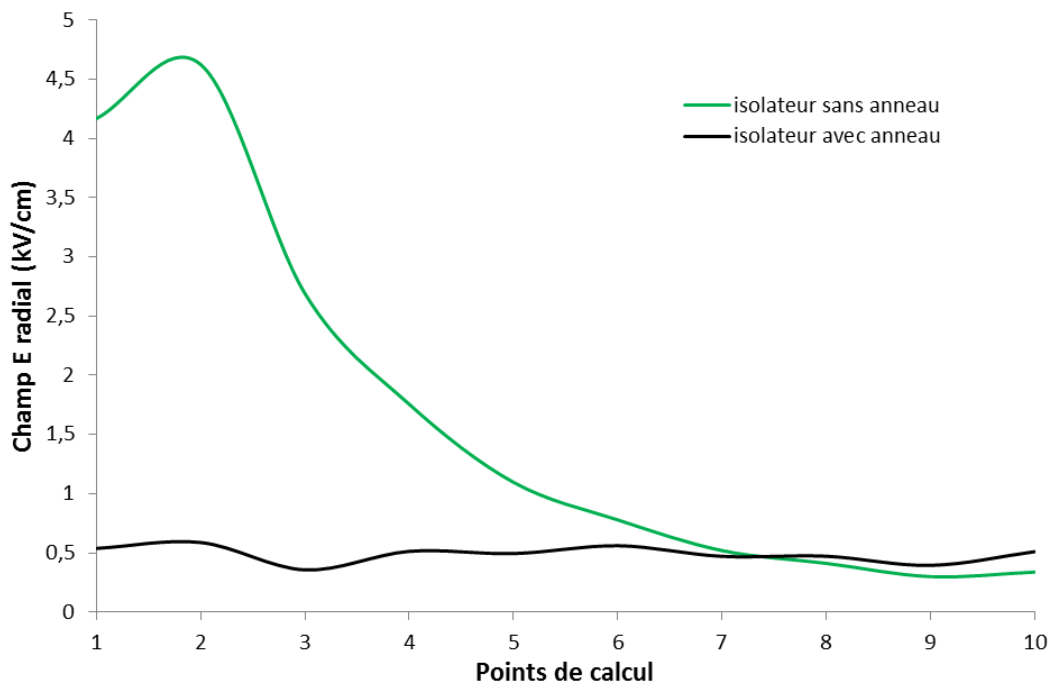


Figure 66 : Champ électrique radial le long des 10 premières jupes à partir de l'électrode H.T. d'un isolateur 230 kV avec/sans anneau de garde

Tableau 15 : Valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ en fonction de la position du défaut

Positions du défaut	Défaut	Composante axiale		Composante radiale	
		Sans anneau	Avec anneau	Sans anneau	Avec anneau
Électrode HT	Défaut 1	0,73	0,73	1,31	1,29
	Défaut 2	0,37	0,39	4,92	4,88
Au milieu de l'isolateur	Défaut 1	0,91	0,91	6,96	7,00
	Défaut 2	0,38	0,38	7,61	7,68
Électrode de mise à la terre	Défaut 1	0,69	0,68	1,28	1,28
	Défaut 2	0,38	0,38	4,71	4,8

4.10.3. Étude de l'influence de l'anneau de garde sur l'orientation du champ à la surface de l'enveloppe.

Cette partie analyse l'orientation du champ électrique à la surface de l'enveloppe de l'isolateur (figure 67) avec ou sans anneau de garde.

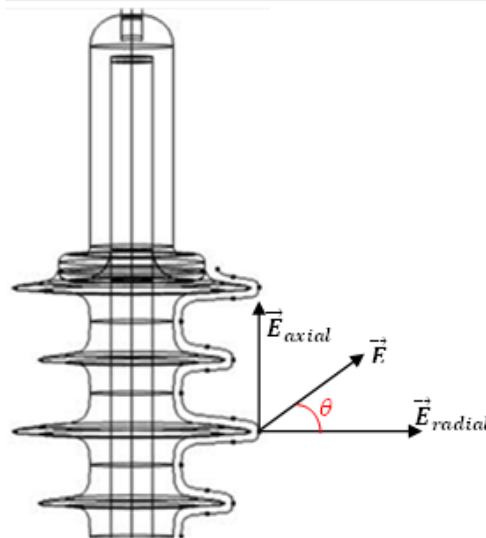


Figure 67 : Illustration de l'orientation θ du champ électrique

Cette orientation a été déterminée à partir des composantes axiale (E_{axial}) et radiale (E_{radial}) du champ électrique suivant l'équation (1) :

Le tableau 16 présente les valeurs du rapport $\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$ (θ_d et $\theta_{s/d}$ ont été déterminés respectivement de la même manière que E_d et $E_{s/d}$).

Les résultats obtenus montrent qu'en présence du défaut 2, le rapport $\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$ avec anneau de garde augmente au voisinage de l'électrode H.T. tandis qu'il reste identique à celui obtenu sans anneau de garde au milieu de l'isolateur et au voisinage de l'électrode de mise à la terre. Cependant, en présence du défaut 1, le rapport $\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$ avec anneau de garde reste identique à celui obtenu sans anneau quel que soit la position du défaut.

Ainsi, la présence d'un anneau de garde à l'électrode H.T. réduit l'influence de certain défaut interne sur l'orientation du champ électrique près de cette électrode. A cet effet, le diagnostic par l'orientation du champ électrique pourrait y être influencé. Cependant au milieu de l'isolateur et près de l'électrode de mise à la terre, l'influence du défaut reste identique à celle en absence d'anneau de garde.

Tableau 16 : Valeurs du rapport $\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$ en fonction du défaut interne

	défaut 1		défaut 2	
	$\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$		$\frac{\theta_d}{\theta_{s/d}}$	
Position du défaut	sans anneau de garde	avec anneau de garde	sans anneau de garde	avec anneau de garde
Électrode HT	0,96	0,94	0,34	0,5
Au milieu de l'isolateur	0,71	0,72	0,43	0,41
Électrode de mise à la terre	0,86	0,86	0,32	0,32

4.11. Influence de la pollution sur la détection des défauts internes

4.11.1. Introduction

Les isolateurs composites sont généralement privilégiés dans les zones à forte pollution naturelle ou industrielle grâce à leur excellente hydrophobicité. Cependant, en raison du vieillissement et de certaines contraintes (électrique et environnementale), leurs propriétés hydrophobes se dégradent, entraînant le dépôt d'une couche de pollution sur la surface de leur enveloppe [56]. En présence de l'humidité, une solution électrolyte se forme et entraîne l'augmentation de la conductivité de la surface de l'enveloppe de l'isolateur.

Dans cette partie, l'influence de la présence d'une couche de pollution sur l'enveloppe d'un isolateur composite sur la détection des défauts internes a été étudiée. L'étude a été réalisée avec un isolateur composite 115 kV dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 6. La pollution a été simulée par une surface conductrice d'épaisseur 0,5 mm et de conductivité $\sigma = 1mS/m$ implémentée dans Comsol Multiphysics comme condition surfacique, tel qu'utilisée dans [65].

Les défauts internes ont été modélisés sous la forme d'un cylindre de diamètre identique (2 mm) et de longueurs différentes : 38 mm (défaut 1) et 76 mm (défaut 2) correspondant respectivement à 3,5 % et 7% de la longueur totale de l'isolateur. Ces défauts ont été positionnés au voisinage de l'électrode H.T. (figure 28-a).

4.11.2. Analyse des résultats

Les figures 68 et 69 présentent respectivement la distribution des composantes axiale et radiale du champ électrique d'un isolateur sans défaut non pollué et pollué. La présence d'une couche de pollution uniforme à la surface de l'isolateur entraîne une modification importante dans les distributions du champ électrique de l'électrode H.T. à l'électrode de mise à la terre. Également, les valeurs du champ électrique augmentent

fortement au voisinage des électrodes. Par conséquent, en présence de pollution, il y a une forte augmentation du risque de décharge couronne au voisinage de ces dernières. En outre, les amplitudes des distorsions causées par la présence de la pollution croissent légèrement de la H.T. à la mise à la terre. De ce constat, il est possible de dire que plus les effets de pollution sont importants, plus les valeurs du champ électrique sont faibles. Ceci confirme les résultats de D.H. Shaffner et al. [33] selon lesquels la pollution s'accumule plus facilement dans les zones de l'isolateur où le champ électrique est faible.

Le tableau 17 met en évidence la difficulté de diagnostiquer les isolateurs composites couverts d'une couche de pollution uniforme. En effet, les valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ pour l'isolateur défectueux pollué sont très proches de l'unité en présence des défauts 1 et 2, ce qui n'est pas le cas pour l'isolateur non pollué, tel que démontré précédemment.

Ainsi, comme pour les défauts externes, la présence d'une couche de pollution uniforme sur la surface d'un isolateur composite rend difficile la détection de certains défauts internes. Ceci s'explique par le fait que la redistribution du champ électrique engendrée par la présence d'une couche de pollution conductrice masque la distorsion locale du champ électrique engendrée par la présence du défaut interne.

Des études futures doivent cependant être menées afin de vérifier expérimentalement ces résultats.

Tableau 17 : Valeurs du rapport $\frac{E_d}{E_{s/d}}$.

Isolateur	défaut 1		défaut 2	
	Composante axiale	Composante radiale	Composante axiale	Composante radiale
Isolateur non pollué	0,65	1,69	0,35	5,18
Isolateur pollué	0,99	0,99	0,99	0,99

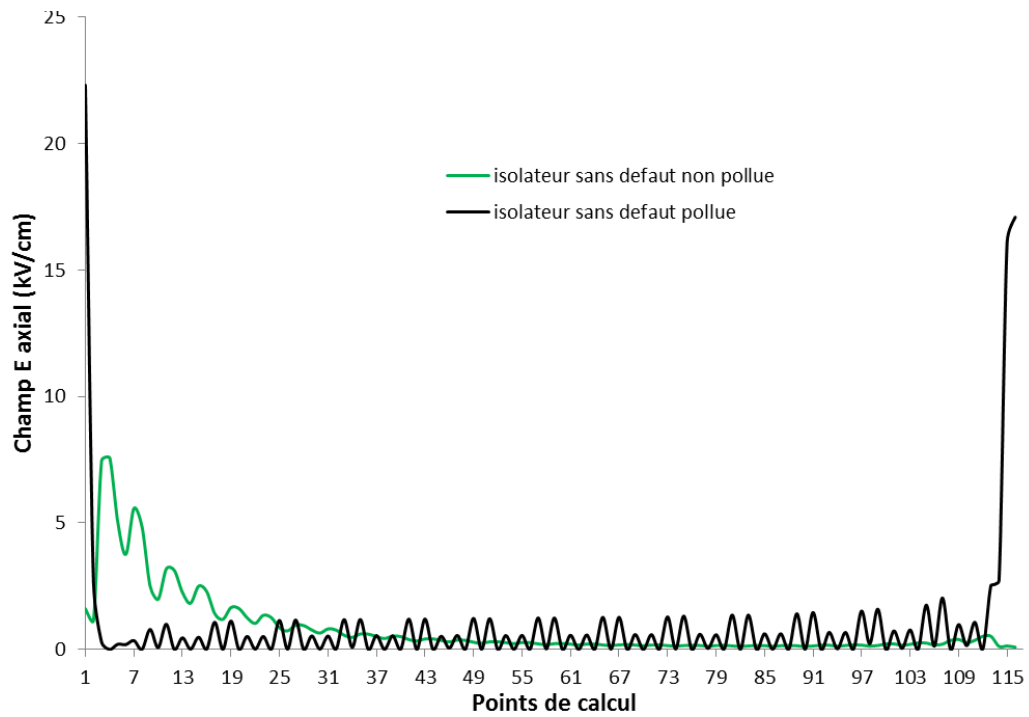


Figure 68 : Champ électrique axial d'un isolateur 115 kV sans défaut pollué et non pollué

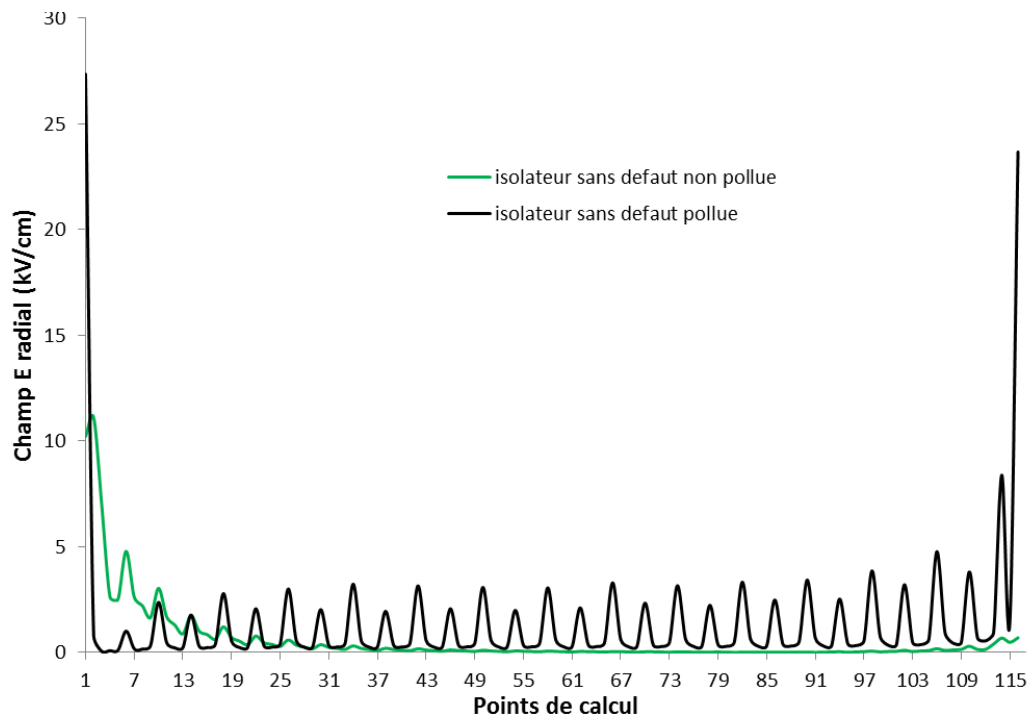


Figure 69 : Champ électrique radial d'un isolateur 115 kV sans défaut pollué et non pollué

4.12. Conclusion

Dans ce chapitre, des études numériques 3D avec des isolateurs composites de transport (69 kV, 115 kV et 230 kV) d'énergie électrique ont été réalisées. Les défauts internes ont été modélisés sous la forme d'un cylindre semi-conducteur de rayon 1 mm avec différentes longueurs correspondants respectivement à 3,5% et 7% de la longueur totale de l'isolateur. Les distributions des composantes axiale et radiale du champ électrique ont été étudiées. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Un modèle numérique 3D simplifié d'isolateur avec réduction du nombre de jupes peut être utilisé à la place du modèle complet sans affecter la précision des résultats numériques.
- Les distorsions du champ électrique induites par les défauts internes sont plus importantes au niveau de la surface de l'enveloppe qu'à l'extrémité des jupes.
- Le défaut interne de longueur correspondant à 3,5% de la longueur totale de l'isolateur, qui n'est pas détectable à partir de l'extrémité des jupes devient détectable près de l'enveloppe de l'isolateur. La distorsion induite par le défaut est également plus marquée avec la composante radiale du champ électrique.
- Le calcul des composantes du champ électrique le long d'une ligne circulaire centrée sur l'enveloppe de l'isolateur permet de détecter et localiser les défauts internes. En outre, l'allure particulière des courbes du champ électrique obtenues peut être utilisée pour le diagnostic automatique des défauts internes.
- Plus les défauts internes sont profonds, moins ils sont détectables.
- Les distorsions dans les composantes du champ électrique induites par un défaut interne dépendent de ses caractéristiques (conductivité, taille et position) et non de la longueur de l'isolateur.
- Le calcul des composantes du champ électrique près de la surface d'un isolateur composite permet d'évaluer de manière précise la longueur de sa section défectueuse.

- Le calcul des composantes du champ électrique près de la surface d'un isolateur composite permet de détecter la présence de chemin semi-conducteur à l'intérieur de la tige conduisant à la fracture tendre.
- La présence d'un anneau de garde à l'électrode H.T. d'un isolateur n'influence pas la qualité du diagnostic de ce dernier en calculant les composantes du champ près de la surface de l'enveloppe.
- Comme pour les défauts externes, la présence de couche de pollution sur la surface de l'enveloppe de l'isolateur rend inefficace la détection des défauts internes.

Ces résultats issus des simulations numériques mettent en évidence les possibilités d'utiliser le capteur EO pour améliorer la méthode de diagnostic des isolateurs composites par la mesure du champ électrique. En outre, le capteur EO peut contribuer à la mise en place de méthode automatique de diagnostic par la mesure du champ électrique autour de l'enveloppe de l'isolateur.

Chapitre 5 :

VALIDATION EXPÉRIMENTALE

5.1. Introduction

L'un des objectifs de ce travail de recherche est d'étudier la possibilité pour le capteur EO de Kapteos de détecter de manière précoce un défaut interne au sein d'un isolateur composite. A cet effet, des tests expérimentaux ont été réalisés au laboratoire de modélisation et de diagnostic des équipements des lignes électriques (MODELE) de l'université du Québec à Chicoutimi qui dispose d'une installation appropriée pour la validation expérimentale de ce projet de recherche.

Cette partie présente les différents appareils utilisés et les procédures expérimentales employées. Enfin, les résultats obtenus pour la détection d'un défaut interne au sein d'un isolateur composite de transport de l'énergie électrique sont présentés.

5.2. Matériels et méthodes

5.2.1. Matériels

5.2.1.1. Capteur électro-optique

La mesure du champ électrique a été effectuée à l'aide d'un capteur électro-optique (EO) récemment développé par le laboratoire IMEP-LHAC et commercialisé par la société Kapteos [4]. Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet Pockels.

Il est constitué d'une sonde (EO) tout fibrée et d'une unité de traitement optoélectronique (figure 70). La modification de l'indice de réfraction est sondée par un faisceau de laser et l'unité de traitement optoélectronique permet d'analyser l'état de polarisation de l'onde optique traversant le cristal pour fournir un signal électrique qui est directement proportionnel à la composante du champ électrique sondée.



Figure 70 : Unité optoélectronique (a) et la sonde fibrée E.O. (b) du capteur EO de Kapteos [57].

5.2.1.2. Isolateur testé.

Les différents tests ont été réalisés avec un isolateur réalisé par impression 3D à partir des dimensions d'un isolateur composite sediver de 69 kV. Il est constitué d'une enveloppe en Nylon, d'une tige en téflon et de deux électrodes en aluminium. Les dimensions et la forme de l'isolateur sont respectivement présentées dans le tableau 18 et à la figure 71. L'ensemble est démontable (figure 72) ce qui permet d'insérer facilement le défaut interne. Le défaut interne a été placé près de l'électrode H.T. et au au potentiel flottant. Les figures 73 et 74 présentent la position du défaut interne respectivement au voisinage de l'électrode H.T. et au potentiel flottant de l'isolateur avant son assemblage pour les mesures. Le défaut interne a été simulé par un ruban semi-conducteur ayant une longueur de 30 mm et une largeur de 3 mm.

La position d'un défaut interne au voisinage de l'électrode de mise à la terre n'a pu être étudiée du fait des contraintes liées à la source d'alimentation de l'isolateur testé. En effet pour l'alimentation de l'isolateur, nous avons utilisé un transformateur monophasé à point milieu délivrant à sa sortie une tension de 12 kV entre phase. Par conséquent, les deux extrémités de l'isolateur sont soumises à des potentiels non nuls.

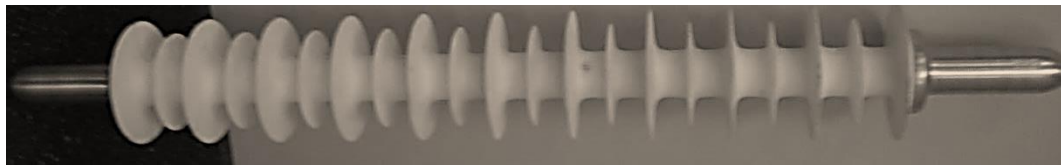


Figure 71 : Modèle expérimentale de l'isolateur composite 69 kV

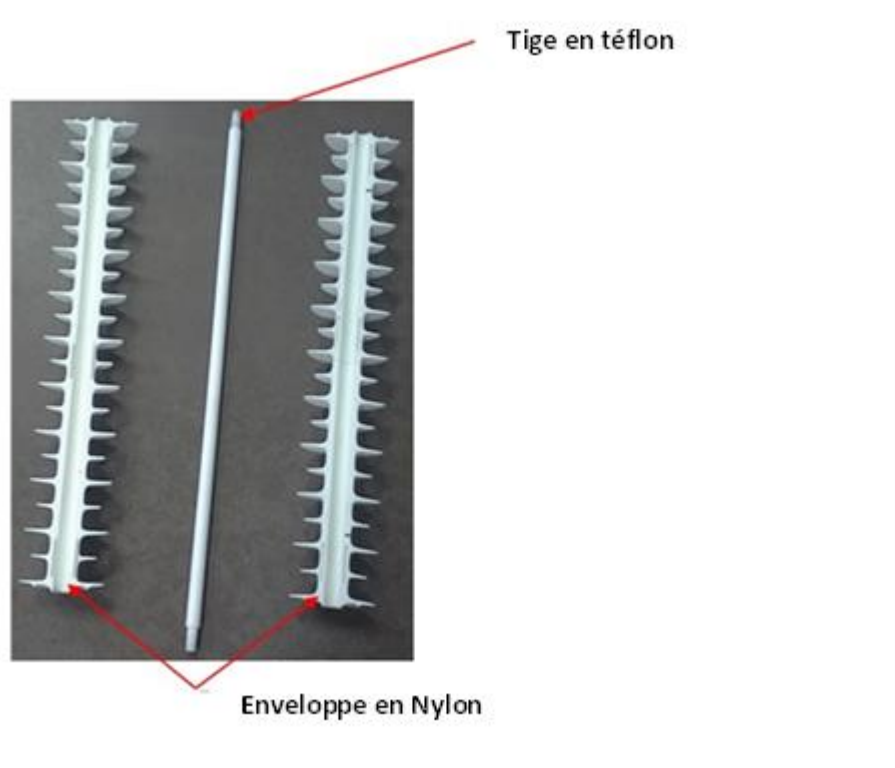


Figure 72 : Différentes composantes de l'isolateur expérimental

Tableau 18 : caractéristique de l'isolateur composite expérimental 69 kV

Longueur X (mm)	866
Diamètre petite jupe D2 (mm)	72
Diamètre grande jupe D1 (mm)	92
Nombre de jupes	21
Diamètre tige (mm)	16
Diamètre enveloppe (mm)	32
Distance d'arc (mm)	601
Distance de fuite (mm)	1810

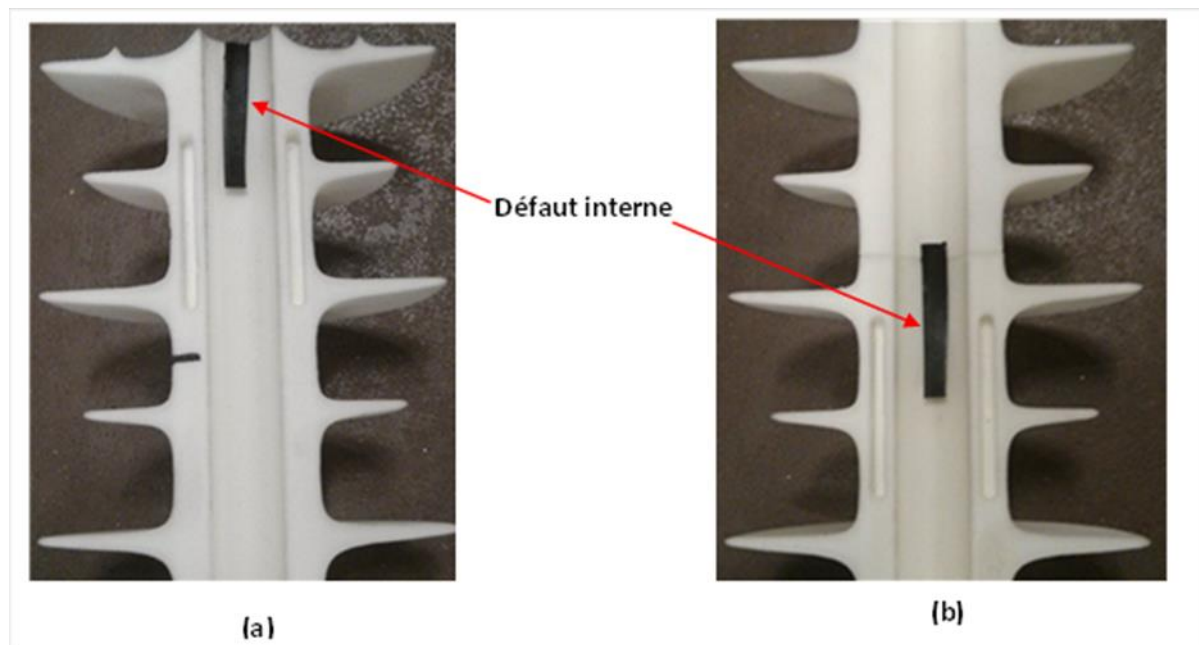


Figure 73 : Défaut interne près de l'électrode H.T. (a) et au potentiel flottant (b)

5.2.1.3. La cage de Faraday

Tous les tests expérimentaux ont été réalisés à l'intérieur d'une cage de Faraday, ce qui permet de créer un état de champ nul en son sein constituant ainsi un écran pour les champs électriques susceptibles de perturber les mesures.

5.2.1.4. Système haute tension

Étant donné qu'une source haute tension de 69 kV entre phase n'était pas disponible afin de simuler la condition de service réelle d'un isolateur composite 69 kV, l'isolateur testé a été alimenté avec une tension entre phase de 12 kV fournie par un transformateur monophasé (figure 74) à point milieu 120 V / 12 kV – 720 VA. Deux câbles haute tension assure l'alimentation de l'isolateur sous test à la sortie du transformateur.

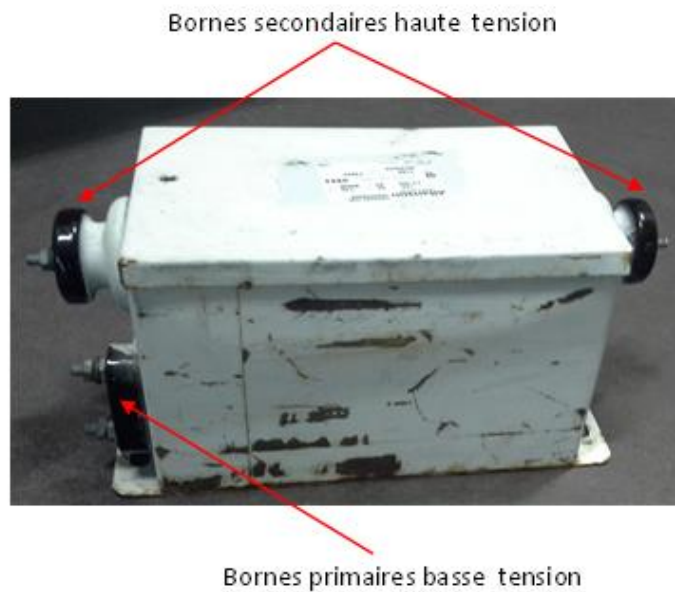


Figure 74 : Transformateur AC 120 V / 12 kV – 720 VA.

5.2.1.5. Système d'acquisition de données

L'unité de traitement optoélectronique est connectée à un oscilloscope pour mesurer la tension à la sortie qui est proportionnelle à l'amplitude de la composante du champ électrique mesurée.

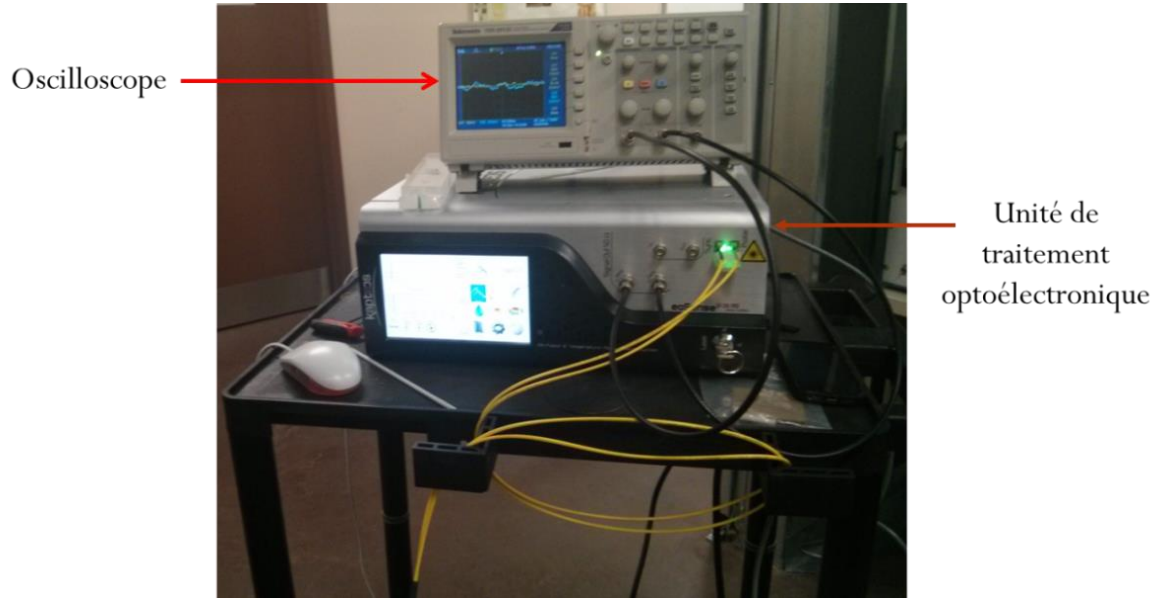


Figure 75 : Système d'acquisition des données

5.2.2. Déroulement des mesures

5.2.2.1. Principe de mesure

Après avoir réalisé le schéma de montage, l'ensemble est mis sous tension. Le plus important avantage du capteur électro-optique est la relation linéaire entre sa réponse et le champ électrique mesuré. Ainsi, pour chaque point de mesure, la valeur de la composante du champ électrique mesurée est obtenue en multipliant par un facteur d'antenne la valeur efficace du signal délivré à la sortie de l'oscilloscope. Les points de

mesures des composantes du champ électrique ont été pris au milieu de la distance inter-jupes (deux jupes consécutives).

Pour chaque point de mesure, une valeur moyenne obtenue à partir de trois mesures effectuées à différentes étapes est calculée afin de vérifier la répétabilité et de réduire les incertitudes liées à la position de la sonde E.O.

Les résultats obtenus en chaque point avec et sans défaut interne sont comparés pour rechercher toute variation qui indique la présence d'un défaut.

5.2.2.2. Schéma de mesure

Les tests expérimentaux simulent la disposition des isolateurs composites de ligne. La figure 76 présente le montage expérimental de l'isolateur composite avec les positions de la sonde EO pour chaque mesure. Les points de mesures des composantes du champ électrique sont numérotés de 1 à 20 d'une électrode à l'autre de l'isolateur.

Pour le défaut situé près de l'électrode H.T., le défaut est situé entre les deux premières jupes (figure 73-a), ce qui correspond au point de mesure 1. Le défaut interne au potentiel flottant est positionné entre les jupes 4, 5 et 6 (figure 73-b), ce qui correspond aux points de mesure 4 et 5.

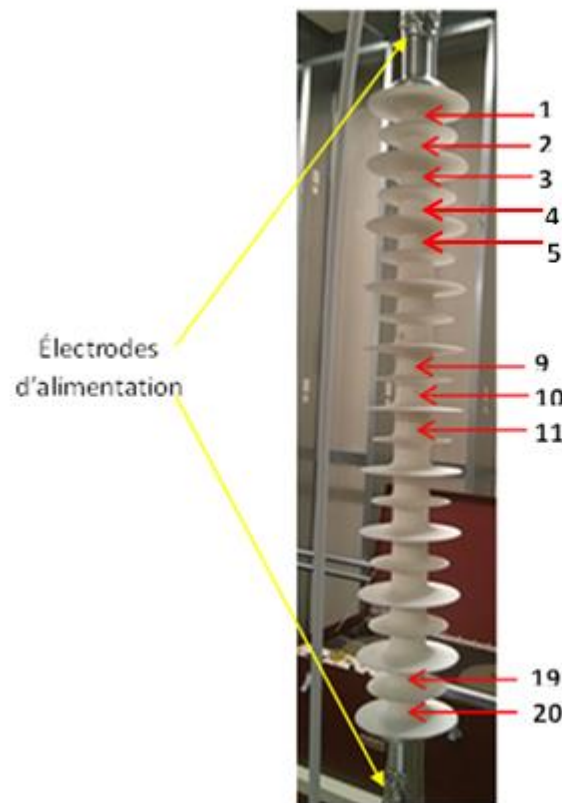


Figure 76 : Disposition expérimentale de l'isolateur et des points de mesure

5.3. Analyse des résultats

5.3.1. Défaut interne près de l'électrode H.T.

Cette partie présente les résultats obtenus pour un défaut interne situé au voisinage de l'électrode H.T. Les composantes axiale et radiale du champ électrique ont été mesurées avec la sonde EO dans les positions 1 à 5. La figure 77 indique la position de la sonde pour les positions 1 à 3. La sonde EO est équipée d'un repère qui permet de l'orienter correctement pour la mesure des deux composantes perpendiculaire du champ électrique.

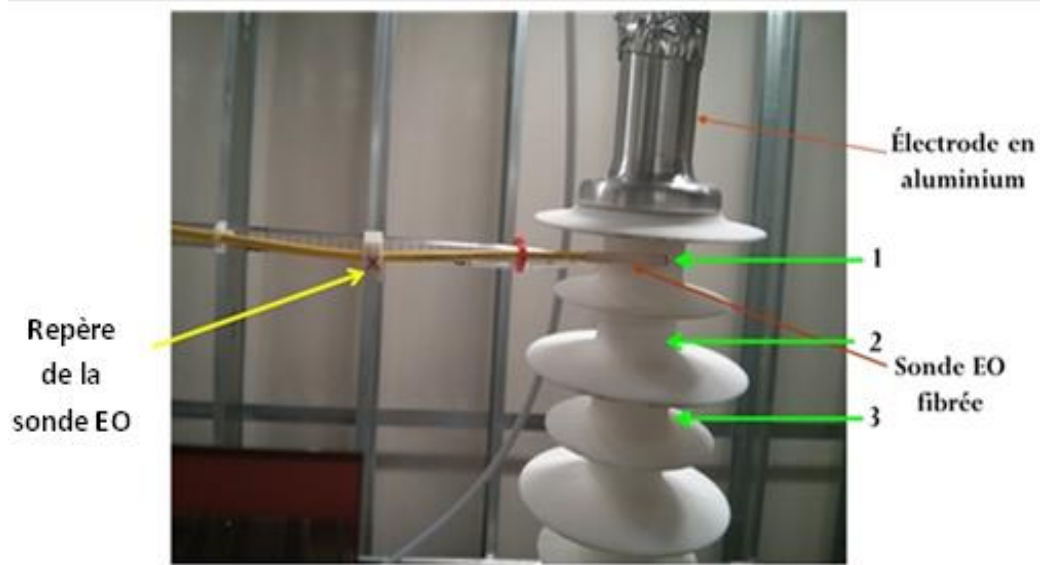


Figure 77 : Positions de la sonde EO pour la mesure des composantes du champ électrique aux points 1 à 3

Les figures 78 et 79 présentent les distributions des composantes axiale et radiale du champ électrique de l'isolateur sans défaut et défectueux. Le tableau 19 présente les valeurs des composantes du champ électrique pour chaque point de mesure de même que les rapports $\frac{E_d}{E_{s/d}}$. Les résultats obtenus montrent que la présence d'un défaut interne semi-conducteur induit une distorsion locale dans les composantes du champ électrique. En outre, les distorsions sont plus importantes au point 1 qui correspond à la zone où se situe le défaut. Cependant, du point 2 à 5 les valeurs des composantes du champ électrique de l'isolateur sans défaut et défectueux sont presque identiques $\left(\frac{E_d}{E_{s/d}} \approx 1\right)$. Également les distorsions sont plus importantes au niveau de la composante radiale qu'axiale du champ électrique, ce qui confirme les résultats numériques présentés dans les sections précédentes.

D'après les résultats obtenus, le capteur électro-optique permet de détecter et localiser un défaut interne semi-conducteur situé au voisinage de l'électrode H.T dont la longueur correspond à 3,5 % de la longueur totale de l'isolateur. Ceci constitue une grande avancée par rapport au vérificateur d'isolateur. En effet, le vérificateur d'isolateur permet de détecter des défauts externes de longueur minimale d'environ 5% de la longueur de l'isolateur lorsque les défauts sont situés au voisinage de l'électrode H.T. [6, 12, 16, 38, 39].

Tableau 19 : Valeurs moyennes des composantes axiale et radiale du champ électrique mesurées aux points 1 à 5 pour un défaut interne à la H.T.

Points de mesure	Isolateur sans défaut		Isolateur avec défautueux		Eaxial	Eradiat
	Eaxial (kV/cm) $E_{s/d}$	Eradiat (kV/cm) $E_{s/d}$	Eaxial (kV/cm) E_d	Eradiat (kV/cm) E_d	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$
1	1,16	0,42	0,98	0,52	0,84	1,27
2	0,67	0,23	0,64	0,25	0,95	1,08
3	0,37	0,14	0,38	0,14	1,02	1,00
4	0,28	0,1	0,28	0,1	1,00	1,00
5	0,2	0,05	0,2	0,05	1,00	1,00

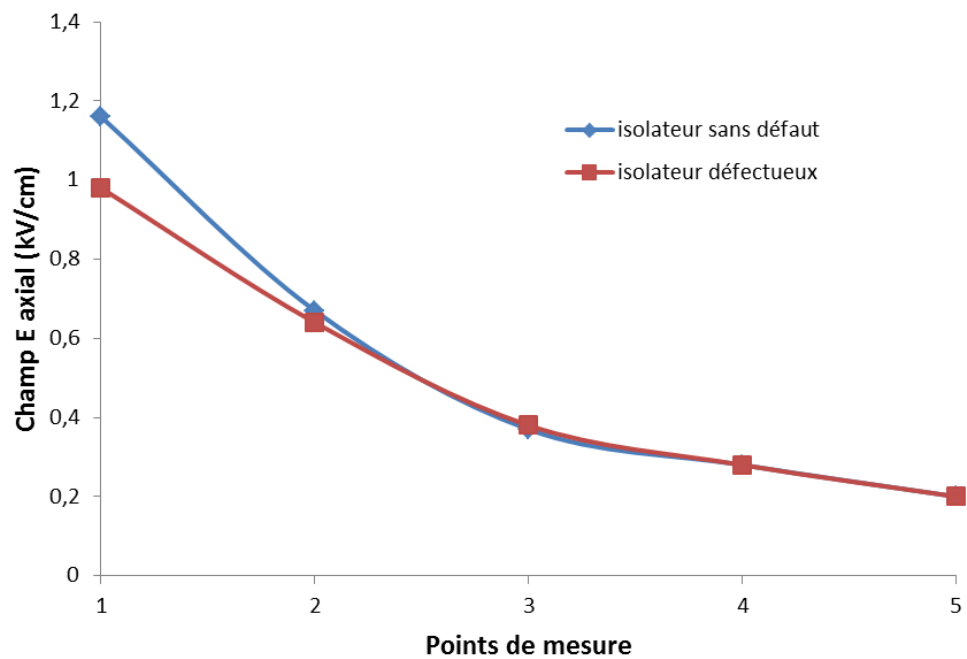


Figure 78 : Composante axiale du champ de l'isolateur sans défaut et défectueux pour un défaut interne à la H.T.

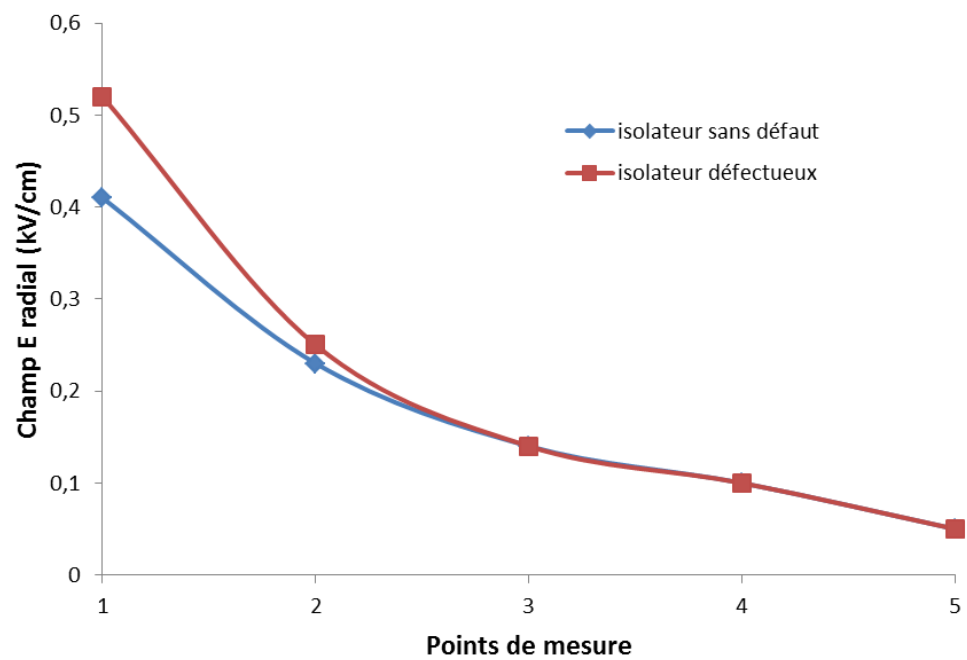


Figure 79 : Composante radiale du champ de l'isolateur sans défaut et défectueux pour un défaut interne à la H.T.

5.3.2. Défaut interne au potentiel flottant

Cette partie présente les résultats obtenus pour un défaut interne situé au potentiel flottant. Les composantes axiale et radiale du champ électrique ont été mesurées avec la sonde EO dans les positions 1 à 8. La figure 80 présente la position de la sonde EO pour les points 4, 5 et 6.

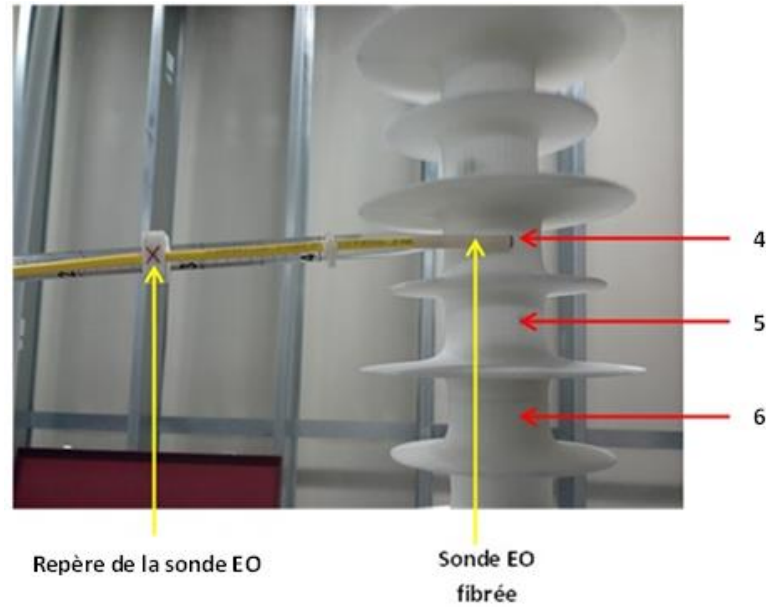


Figure 80 : Position de la sonde EO pour la mesure des composantes du champ aux points 4, 5 et 6

Les figures 81 et 82 présentent les distributions des composantes axiale et radiale du champ électrique de l'isolateur sans défaut et défectueux. Le tableau 20 présente les valeurs des composantes du champ électrique pour chaque point de mesure de même que les rapports $\frac{E_d}{E_{s/d}}$. Les résultats obtenus montrent que la présence d'un défaut interne semi-conducteur induit une distorsion locale dans les composantes du champ électrique. En outre, les distorsions sont plus importantes aux points 4 et 5 qui correspondent à la zone où se situe le défaut. Cependant, pour les autres points de mesure les valeurs des composantes du champ électrique de l'isolateur sans défaut et défectueux sont presque

identiques ($\frac{E_d}{E_{s/d}} \approx 1$). Également, les distorsions sont plus importantes au niveau de la composante radiale qu'axiale du champ électrique. En outre, à partir des rapports $\frac{E_d}{E_{s/d}}$ les distorsions induites par le défaut interne dans la composante axiale du champ électrique sont très faible. Par conséquent la composante radiale du champ électrique est la mieux adaptée pour la détection d'un défaut interne au potentiel flottant de l'isolateur avec une augmentation significative de cette dernière d'environ 15%. Ceci montre l'importance de mesurer deux composantes pour le diagnostic des isolateurs par la mesure du champ électrique.

D'après ce qui précède, il semble que le capteur EO permet de détecter et localiser un défaut interne semi-conducteur situé au potentiel flottant de l'isolateur dont la longueur correspond à 3,5 % de la longueur totale de l'isolateur. Ceci constitue une grande avancée par rapport au vérificateur d'isolateur. En effet, ce dernier permet de détecter des défauts de longueur minimale d'environ 12% de la longueur de l'isolateur lorsque les défauts sont situés au milieu de l'isolateur (potentiel flottant) [6, 12, 16, 38, 39].

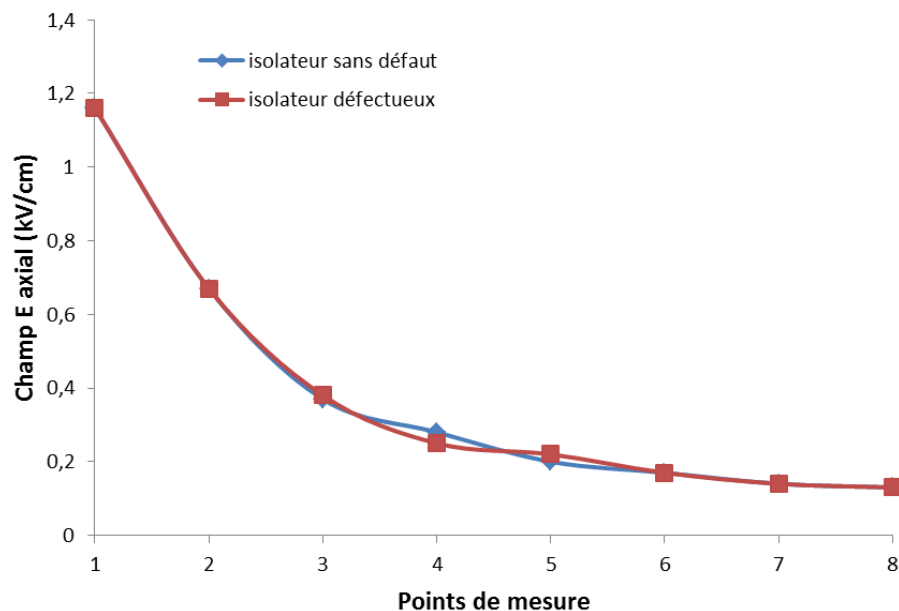


Figure 81 : Composante axiale du champ de l'isolateur sans défaut et défectueux pour un défaut interne au potentiel flottant.

Tableau 20 : Valeurs moyennes des composantes axiale et radiale du champ électrique mesurées aux points 1 à 8 pour un défaut interne au potentiel flottant.

	Isolateur sans défaut		Isolateur avec défaut		Eaxial	Eraxial
Points de mesure	Eaxial (kV/cm)	Eraxial (kV/cm)	Eaxial (kV/cm)	Eraxial (kV/cm)	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$	$\frac{E_d}{E_{s/d}}$
1	1,16	0,42	1,16	0,42	1,00	1,00
2	0,67	0,23	0,67	0,23	1,00	1,00
3	0,37	0,14	0,38	0,13	1,03	0,93
4	0,28	0,1	0,25	0,08	0,89	0,8
5	0,20	0,05	0,22	0,06	1,10	1,2
6	0,17	0,03	0,17	0,03	1,00	1,00
7	0,14	0,02	0,14	0,02	1,00	1,00
8	0,13	0,015	0,13	0,015	1,00	1,00

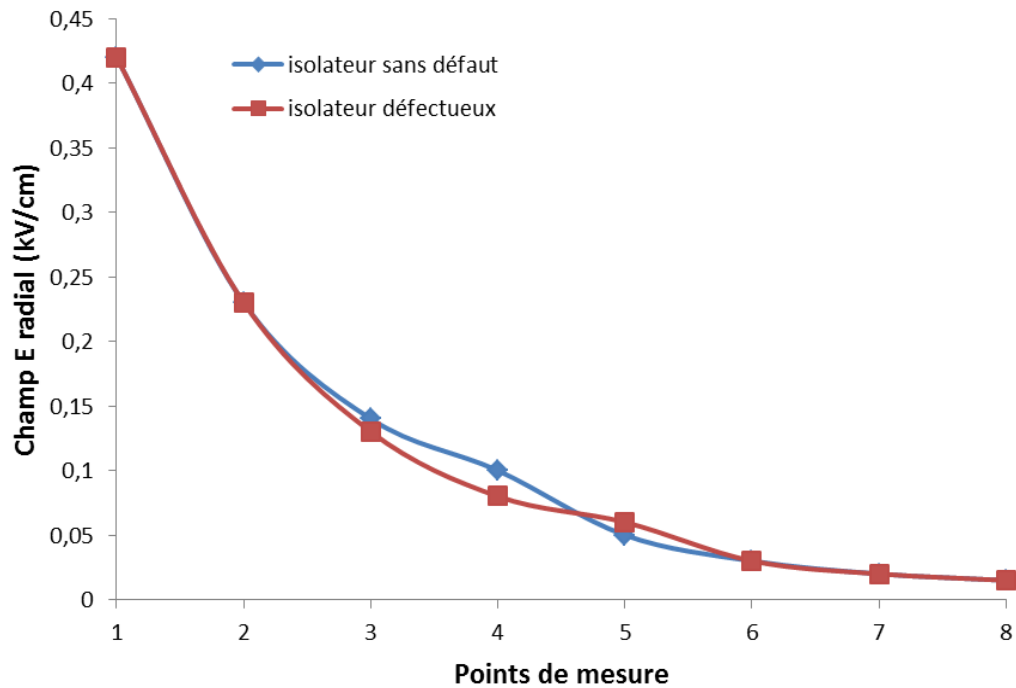


Figure 82 : Composante radiale du champ de l'isolateur sans défaut et défectueux pour un défaut interne au potentiel flottant.

5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, des tests en laboratoire avec un prototype d'isolateur composite défectueux de 69 kV ont été réalisés. Le défaut interne a été simulé par un ruban semi-conducteur ayant une longueur de 30 mm (correspondant à 3,5 % de la longueur totale de l'isolateur) et une largeur de 3 mm. Ce dernier a été positionné près de l'électrode H.T. et au potentiel flottant de l'isolateur. Les résultats expérimentaux ont permis de démontrer que :

- Le capteur EO est capable de détecter un défaut interne semi-conducteur de longueur correspondant à 3,5% de la longueur totale de l'isolateur près de l'électrode H.T. et au potentiel flottant.

- Le défaut interne situé près de l'électrode H.T. induit une déformation plus importante que celui situé au potentiel flottant. Ceci confirme les résultats numériques.
- Le capteur EO permet de localiser avec précision la position d'un défaut interne au sein d'un isolateur.

En somme, il est possible d'affirmer que le capteur EO peut être utilisé pour améliorer la sensibilité de la méthode de diagnostic des isolateurs composites par la mesure du champ électrique. En effet, comparé au vérificateur d'isolateur, le capteur EO permet de détecter près de l'électrode H.T. et au potentiel flottant de l'isolateur, un défaut interne de longueur correspondant à 3,5% de la longueur totale de l'isolateur. Ceci constitue une amélioration considérable de la sensibilité de la méthode car jusqu'ici seuls les défauts externes de longueur minimale d'environ 5% de la longueur de l'isolateur étaient visibles à l'électrode HT tandis que pour les défauts situés entre les jupes la longueur minimale visible était d'environ 12 % de la longueur totale de l'isolateur [6, 12, 16, 38, 39].

Chapitre 6 :

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS

6.1. Conclusions

La détection des défauts internes au sein des isolateurs composites est une préoccupation importante pour les fournisseurs d'énergie électrique qui doit être résolue en vue d'assurer la sécurité des opérateurs et la fiabilité des réseaux électriques. En effet, les défauts internes peuvent conduire à la rupture mécanique de l'isolateur ou au contournement (interne ou externe) entre les électrodes de haute tension et de mise à la terre. Ces incidents qui peuvent être évités si les défauts internes sont détectés le plus tôt possible justifient des études à mener pour l'amélioration des méthodes de diagnostics actuellement utilisées.

Le présent projet de recherche avait pour objectif de mener une étude numérique exhaustive ainsi qu'une validation expérimentale pour la détection des défauts internes au sein des isolateurs composites par la mesure du champ électrique à l'aide d'un capteur EO. En effet, le capteur EO qui permet des mesures ponctuelles et simultanées des composantes axiale et radiale entre les jupes représente un axe de recherche prometteur pour améliorer les performances de la méthode de diagnostic basée sur la mesure du champ électrique considérée comme la plus sensible.

6.1.1. Contributions des études numériques

Afin de détecter la présence des défauts internes au sein des isolateurs composites, des études numériques 3D ont été réalisées avec des isolateurs composites de distribution (28 kV) et de transport (69 kV, 115 kV et 230 kV) d'énergie électrique. Les défauts internes ont été modélisés sous la forme d'un cylindre semi-conducteur avec différentes longueurs correspondants respectivement à 3,5% et 7% de la longueur totale de l'isolateur. Les distributions des composantes axiale et radiale du champ électrique ont été étudiées conformément aux caractéristiques du capteur EO. Les principales contributions numériques de ce travail de recherche sont les suivants :

- Un modèle numérique 3D simplifié d'isolateur avec réduction du nombre de jupes peut être utilisé à la place du modèle complet sans affecter la précision des résultats numériques.
- Les distorsions du champ électrique induites par les défauts internes sont plus importantes au niveau de la surface de l'enveloppe qu'aux extrémités des jupes. Cela démontre que le calcul des composantes du champ électrique près de la surface d'un isolateur peut améliorer la sensibilité de la méthode de diagnostic par la mesure du champ électrique. les distorsions sont plus marquées pour la composante radiale que la composante axiale.
- Les défauts internes de longueur correspondant à 3,5% de la longueur totale de l'isolateur qui ne sont pas détectable à partir des extrémités des jupes sont détectables près de la surface de l'enveloppe de l'isolateur.
- La mesure simultanée des composantes axiale et radiale du champ électrique permet de déterminer l'orientation du champ électrique à la surface de l'enveloppe qui s'avère être un outil supplémentaire et efficace pour la détection des défauts internes.
- Le calcul des composantes du champ électrique le long d'une ligne circulaire centrée sur l'enveloppe de l'isolateur permet de détecter et localiser les défauts internes. En outre, l'allure particulière des courbes du champ électrique obtenues peut être utilisée pour la détection automatique des défauts internes.
- Plus les défauts internes sont profonds, moins ils sont détectables.
- Les distorsions du champ électrique induites par un défaut interne dépendent de ses caractéristiques (conductivité, taille et position) et non de la longueur de l'isolateur.
- Le calcul des composantes du champ électrique près de la surface d'un isolateur composite permet d'évaluer de manière précise la longueur de sa section défectueuse. Ceci permettra non seulement de garantir la sécurité des opérateurs

pour les travaux en ligne mais constitue aussi un gage de faisabilité et de pertinence pour la méthode proposée.

- Le calcul des composantes du champ électrique près de la surface d'un isolateur composite permet de détecter la présence de chemin semi-conducteur à l'intérieur de la tige d'un isolateur conduisant à sa fracture tendre.
- La présence d'anneau de garde à l'électrode H.T. d'un isolateur n'influence pas le diagnostic de ce dernier. Cela constitue un avantage du calcul des composantes du champ électrique près de la surface de l'enveloppe de l'isolateur qu'à l'extrémité des jupes.
- Comme pour les défauts externes, la présence de couche de pollution sur la surface de l'enveloppe de l'isolateur affecte la détection des défauts internes.

Ces résultats issus des simulations numériques mettent en évidence les performances du capteur EO qui peut être utilisé pour améliorer la méthode de diagnostic des isolateurs composites par la mesure du champ électrique. En outre, le capteur EO peut contribuer à la mise en place de méthode automatique de diagnostic par la mesure du champ électrique autour de l'enveloppe de l'isolateur.

6.1.2. Contributions de la validation expérimentale

Pour détecter la présence d'un défaut interne au sein d'un isolateur composite, nous avons réalisés des tests en laboratoire sur un prototype d'isolateur composite de 69 kV. Le défaut interne a été simulé par un ruban semi-conducteur ayant une longueur de 30 mm (correspondant à 3,5 % de la longueur totale de l'isolateur) et une largeur de 3 mm. Le défaut interne a été positionné près de l'électrode H.T. et au potentiel flottant.

La nouvelle méthode de diagnostic des isolateurs composites par la mesure du champ électrique basée sur l'utilisation du capteur EO et présentée dans ce travail montre certains avantages par rapport à la méthode actuellement employée et utilisant le

vérificateur d'isolateur. En effet, la technologie du capteur EO (mesure simultanée de deux composantes perpendiculaire du champ électrique) offre un paramètre supplémentaire pour la détection des défauts. En outre, la taille compacte (mesure ponctuelle) de la sonde EO permet de faire des mesures aux plus près de l'enveloppe de l'isolateur où les distorsions induites par le défaut interne sont plus importantes. Ainsi, le capteur EO permet une bonne estimation de la section totale de l'isolateur affectée par le défaut interne.

De plus, il est important de mentionner que les conditions expérimentales utilisées et particulièrement la tension appliquée à l'isolateur était loin d'être optimale, faute d'avoir à notre disposition une source de tension adéquate. Malgré ce désagrément, les résultats obtenus sont plus qu'encourageants.

6.2. Recommandations

Afin de proposer l'utilisation de la méthode de diagnostic des isolateurs composites par la mesure EO du champ électrique sur site, des investigations supplémentaires seront nécessaires. A cet effet, quelques axes de recherches pour les futurs travaux peuvent être proposés:

- La réalisation des tests expérimentaux avec des équipements H.T. dans le but de simuler la condition réelle de service des isolateurs composites.
- L'étude du comportement du capteur EO dans les conditions polluées et humides.
- La mise en place d'un dispositif de détection automatique des défauts par la mesure du champ électrique le long d'une ligne circulaire centrée sur l'enveloppe de l'isolateur.

Bibliographie

- [1] B. O. Ravi Gorur, Art Kroese, Fred Cook, Senthil Kumar S. (2004, 27 October). *Evaluation of Critical Components of Non-Ceramic Insulators (NCI) In-Service : Role of Defective Interfaces*. Available: http://www.pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2004_reports/
- [2] A. Pigini, "HV Composite Insulators Today," *Quarter One*, vol. 19, 2011.
- [3] T. Kikuchi, S. Nishimura, M. Nagao, K. Izumi, Y. Kubota, and M. Sakata, "Survey on the use of non-ceramic composite insulators," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 548-556, 1999.
- [4] J. M. Volat C, Farzaneh M, and Duvillaret, L., "New method for in live-line detection of small defects in composite insulator based on electro-optic E-field sensor," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 194-201, 2013.
- [5] S. M. Gubanski, A. Dernfalk, J. Andersson, and H. Hillborg, "Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 1065-1080, 2007.
- [6] P. A. EPRI, CA, 2004, and 1008817, "EPRI Survey of Utility Experiences with Composite/Polymer Components in Transmission Class (69 - 765 kV class) Substations."
- [7] R. S. Gorur, E. A. Cherney, and J. T. Burnham, *Outdoor insulators*: Ravi S. Gorur, 1999.
- [8] R. W. Harmon, G. G. Karady, and O. G. Amburgey, "Electrical test methods for nonceramic insulators used for live line replacement," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 12, pp. 965-970, 1997.
- [9] J. S. F. SCHMUCK, I. GUTMAN and A. PIGINI, "Assessment of the Condition of Overhead Line Composites Insulators " *CIGRE*, vol. B2-214, 2012.
- [10] G. H. Vaillancourt, J. P. Bellerive, M. St-Jean, and C. Jean, "New live line tester for porcelain suspension insulators on high-voltage power lines," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 208-219, 1994.
- [11] B. O. RAVI GORUR, Art Kroese, Fred Cook and Senthil Kumar S., "Evaluation of Critical Components of Non-Ceramic Insulator (NCI) In-service : Role of Defective Interfaces," *Power Systeme Engineering Research Center*, pp. 04-32, August 2004.
- [12] M. H. G.H. Vaillancourt, J. Frate, "Experience with two Faulty Composite Insulators Detection Methods in Hydro-Quebec " *10th International Symposium on High Voltage Engineering*, vol. 4, pp. 109-113, Montreal, Quebec, Canada, 1997 1997.
- [13] Positron, "Positron Insulator Testers."
- [14] A. J. Phillips, J. Kuffel, A. Baker, J. Burnham, A. Carreira, E. Cherney, *et al.*, "Electric Fields on AC Composite Transmission Line Insulators," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 823-830, 2008.

- [15] F. Schmuck, J. Seifert, I. Gutman, and A. Pigini, "Assessment of the condition of overhead line composite insulators," 2012.
- [16] S. C. a. C. J. G.H. Vaillancourt, "Experience with the Detection of Faulty Composite Insulators on High-Voltage Power Lines By the Electric Field Measurement Method " *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 13, April 1998.
- [17] ELECTRA, "Review of In service diagnostic testing of composite insulators," *CIGRE WG 22.03*;, vol. No. 169,, pp. p. 105-119, December 1996,.
- [18] R. Hackam, "Outdoor HV composite polymeric insulators," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 557-585, 1999.
- [19] A. D. a. D. Sims., "Weathering of polymers," *Esses, UK*, 1983.
- [20] V. M. Moreno and R. S. Gorur, "Effect of long-term corona on non-ceramic outdoor insulator housing materials," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 8, pp. 117-128, 2001.
- [21] M. S. Weiguo Que, "Electric field and voltage distributions along non-ceramic insulators," Doctor, Department of Electrical Engineering, The Ohio State University, 2002.
- [22] **M. Costea** and **I. Baran**, "a Comparative Analysis of Classical and Composite Insulators Behavior," *University" Politehnica" of Bucharest Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, vol. 74, pp. 147-154, 2012.
- [23] C. A. Spellman, H. M. Young, A. Haddad, A. R. Rowlands, and R. T. Waters, "Survey of polymeric insulator ageing factors," in *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467)*, 1999, pp. 160-163 vol.4.
- [24] S. Amin and M. Amin, "Natural aging of SiR insulators in Pakistan," in *Emerging Technologies, 2009. ICET 2009. International Conference on*, 2009, pp. 114-117.
- [25] R. Hartings, "Electric fields along a post insulator: AC-measurements and calculations," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 912-918, 1994.
- [26] R. Hernandez-Corona, I. Ramirez-Vazquez, and G. Montoya-Tena, "Evaluation in Laboratory of the Visual Corona and Electric Field Measurement Techniques to Inspect Polymeric Insulators," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES*, 2006, pp. 601-604.
- [27] B. Pinnangudi, R. S. Gorur, and A. J. Kroese, "Quantification of corona discharges on nonceramic insulators," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, pp. 513-523, 2005.
- [28] V. M. Moreno and R. S. Gorur, "Corona-induced degradation of nonceramic insulator housing materials," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001 Annual Report. Conference on*, 2001, pp. 640-643.
- [29] D. A. Phillips, "Degradation & Failure Modes of Composite Insulators," *IEEE*.
- [30] INMR, vol. 2014, Condition Detection of Non-Ceramic Insulators For Live Line Work at Electric Utilities.
- [31] A. Haddad, H. Griffiths, and R. T. Waters, "Principles of Anti-Fog Design for Polymeric Insulators," in *Solid Dielectrics, 2007. ICSD '07. IEEE International Conference on*, 2007, pp. 302-305.

- [32] G. G. Karady, "Flashover mechanism of non-ceramic insulators," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 718-723, 1999.
- [33] D. H. Shaffner, D. L. Ruff, and G. H. Vaillancourt, "Experience with a composite insulator testing instrument based on the electric field method," in *Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. 2000 IEEE ESMO - 2000 IEEE 9th International Conference on*, 2000, pp. 318-327.
- [34] N. Yoshimura, S. Kumagai, and S. Nishimura, "Electrical and environmental aging of silicone rubber used in outdoor insulation," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 632-650, 1999.
- [35] H. Chan-Su, Y. Bok-Hee, and L. Sang-Youb, "Degradation in silicone rubber used for outdoor insulator by UV radiation," in *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on*, 2000, pp. 367-370 vol.1.
- [36] P. Lindner, "Inspection for corona and arcing with the Daycor camera," in *2005 World Congress and Exhibition on insulators, arresters & bushings Hong Kong*, 2005.
- [37] J. S. F. SCHMUCK, I. GUTMAN and A. PIGINI, "Assessment of the Condition of Overhead Line Composites Insulators " *CIGRE*, 2012.
- [38] S. Kaana-Nkusi, P. H. Alexander, and R. Hackam, "Potential and electric field distributions at a high voltage insulator shed," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 307-318, 1988.
- [39] G. Gela and D. Mitchell, "Assessing the electrical and mechanical integrity of composite insulators prior to live working," in *Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. 2000 IEEE ESMO - 2000 IEEE 9th International Conference on*, 2000, pp. 339-343.
- [40] C. Volat, L. Duvillaret, and G. Gaborit, "Detection of AC corona discharges using an electro-optic E-field sensor," in *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on*, 2012, pp. 95-98.
- [41] B. Kolner and D. Bloom, "Electrooptic sampling in GaAs integrated circuits," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 22, pp. 79-93, 1986.
- [42] S. J. Huang and D. C. Erickson, "The potential use of optical sensors for the measurement of electric field distribution," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 4, pp. 1579-1585, 1989.
- [43] H. Kopola, A. Thansandote, J. Chrostowski, and S. S. Stuchly, "An optical E-field sensor," in *Precision Electromagnetic Measurements, 1990. CPEM '90 Digest., Conference on*, 1990, pp. 196-197.
- [44] L. Duvillaret, S. Rialland, and J.-L. Coutaz, "Electro-optic sensors for electric field measurements. I. Theoretical comparison among different modulation techniques," *JOSA B*, vol. 19, pp. 2692-2703, 2002.
- [45] L. Duvillaret, S. Rialland, and J.-L. Coutaz, "Electro-optic sensors for electric field measurements. II. Choice of the crystals and complete optimization of their orientation," *JOSA B*, vol. 19, pp. 2704-2715, 2002.

- [46] M. Bernier, L. Duvillaret, G. Gaborit, A. Paupert, and J. L. Lasserre, "Fully Automated E-Field Measurement System Using Pigtailed Electro-Optic Sensors for Temperature-Dependent-Free Measurements of Microwave Signals in Outdoors Conditions," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 9, pp. 61-68, 2009.
- [47] J.-L. LASSERRE, P. BRUGUIÈRE, C. Gramat, L. DUVILLARET, G. GABORIT, K. IMEP-LAHC, et al., "Mesure d'impulsions microondes de forte puissance par sondes électro-optiques," *Revue scientifi que et technique de la Direction des applications militaires*, vol. 44, Novembre 2013.
- [48] H. El-Kishky and R. S. Gorur, "Electric field computation on an insulating surface with discrete water droplets," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 450-456, 1996.
- [49] C. M. a. S. Chandrasekar, "Finite Element Modeling for Electric Field and Voltage Distribution along the Polluted Polymeric Insulator," *World Journal of Modeling and Simulation*, vol. 8, pp. 310-320, 2012.
- [50] W. Sima, Q. Yang, C. Sun, and F. Guo, "Potential and electric-field calculation along an ice-covered composite insulator with finite-element method," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, vol. 153, pp. 343-349, 2006.
- [51] G. Zhicheng, W. Liming, Y. Bo, L. Xidong, and L. Zhi, "Electric field analysis of water drop corona," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 964-969, 2005.
- [52] C. Volat, "Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin conductive layer," in *Electrical Insulation Conference (EIC), 2013 IEEE*, 2013, pp. 409-413.
- [53] C. Yang Chun, L. Cheng-rong, L. Xidong, and W. Shaowu, "The influence of water and pollution on diagnosing defective composite insulator by electric field mapping," in *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467)*, 1999, pp. 345-348 vol.4.
- [54] R. W. Pryor. (2012). *Multiphysics Modeling Using Comsol^R 4*.
- [55] A. USA/Canada. (2008, 30 September). *Sediver composite suspension insulators*. Available: <http://www.sediver.com/>
- [56] W. Que, "Electric field and voltage distributions along non-ceramic insulators," The Ohio State University, 2002.
- [57] Kapteos. (23 October). Available: <http://www.kapteos.com/fr/>
- [58] M. de Nigris, I. Gutman, and A. Pighini, "Live-line maintenance of AC overhead lines equipped with non ceramic insulators (NCI)," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES*, 2010, pp. 1-6.
- [59] J. Montesinos, R. S. Gorur, B. Mobasher, and D. Kingsbury, "Mechanism of brittle fracture in nonceramic insulators," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 236-243, 2002.
- [60] M. Kumosa, L. Kumosa, and D. Armentrout, "Causes and potential remedies of brittle fracture failure of composite (nonceramic) insulators," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 1037-1048, 2004.

- [61] C. de Turreil, L. Pargamin, G. Thevenet, and S. Prat, "'Brittle fracture" of composite insulators: why and how they occur," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, 2000, pp. 2569-2574.
- [62] M. Kumosa and Q. Qiu, "Failure analysis of composite insulators (failure investigation of 500 kV non-ceramic insulators for Pacific Gas & Electric Company)," *Final Report to the Pacific Gas and Electric Company*, 1996.
- [63] D. S. Usa, V. P. K. , D.Edison Selvaraj, M. M. K. S. , and M. C. D. A. , "PERFORMANCE ANALYSIS OF NON-CERAMIC INSULATORS FOR HIGH VOLTAGE TRANSMISSION," *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, vol. 1, pp. 247-253, September-October 2012.
- [64] C. Yangchun and L. Chengrong, "Online detecting composite insulators by two dimensions electric field distribution," in *Electrical Insulation, 2006. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on*, 2006, pp. 132-135.
- [65] C. Multiphysics, "COMSOL Multiphysics User Guide (Version 4.3 a)," *COMSOL, AB*, 2012.